

Prof. dr hab. inż. Leszek Klimek
Politechnika Łódzka
Instytut Inżynierii Materiałowej

Łódź dn. 02. 11. 2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Zorychty-Tomsi pt.: „Laserowe przetwarzanie proszków SLM w zastosowaniu na implanty ubytków żuchwy w oparciu o numeryczne badania przenoszenia obciążeń zgryzowych”

**wykonana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria
Materiałowa Politechniki Śląskiej**

1. Charakterystyka ogólna pracy

Odtwarzania utraconych lub w jakikolwiek sposób zniszczonych elementów organizmu jest problemem, z którym ludzkość borykała się już od najdawniejszych czasów. Czasy, w których żyjemy, postęp technologiczny sprawia, obciążenia środowiskowe sprawiają, że ludzie narażeni są na różnego rodzaju urazy, skutkujące nieraz znacznymi ubytkami twardych tkanek organizmu ludzkiego. Rozwój chirurgii, biomateriałów, spowodował znaczną poprawę w możliwościach odbudowy tych tkanek. Jednak nadal wyzwaniem dla lekarzy jest odbudowa twardych tkanek w obrębie twarzoczaszki i nie chodzi tu o uzupełnianie utraconych zębów, a o odbudowę dużych ubytków kostnych w obrębie twarzoczaszki, głównie obszary szczęki i żuchwy, ale także okolice oczodołów. Coraz częściej podczas leczenia implantologicznego stosuje się implanty indywidualne. Po wykonaniu badania tomograficznego przygotowany jest wirtualny model struktury anatomicznej pacjenta, a następnie wirtualny model implantu, który jest później drukowany za pomocą drukarki 3D. Tak wykonany element chirurg dokładnie dopasowuje do powierzchni ubytku. Implant indywidualny jest przeznaczony dla konkretnego pacjenta i jest tworzony na podstawie jego własnej anatomii, dzięki temu będzie idealnie do niego pasował.

Biorąc pod uwagę charakter pracy układu stomatognatycznego i generowane w trakcie żucia obciążenia ze strony sił zgryzowych w projektowaniu implantów przeznaczonych do odbudowy należy uwzględnić nie tylko kryterium wytrzymałość tego implantu, ale także

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 6. 11. 2023
RD 3Ma | RMT 512 | 17. 11. 2023
nr zał.

wytrzymałość tkanki kostnej, która go otacza. Biorąc pod uwagę istotne różnice w parametrach wytrzymałościowych materiałów stosowanych na implanty oraz tkanek kostnych wskazane jest zmniejszenie sztywności samego implantu i przeniesienie większej części obciążenia na kość, co powinno zmniejszyć ryzyko zaniku kości w efekcie niedociążenia. Jak zaznaczyła Doktorantka „... brakuje poprawnej metodyki projektowania nośności implantów, dzięki której w indywidualnym przypadku zapewniona jest nośność implantu oraz jednocześnie przewidywane są efekty przeciążeniowe i niedociążeniowe w tkance kostnej”. W związku z powyższym przy jego projektowaniu należy uwzględnić informacje dotyczące stanu kości pacjenta (jakość i grubość tkanki korowej).

Jako cel pracy doktorantka postawiła sobie „Opracowanie metodyki wytwarzania tytanowych implantów rozległych ubytków żuchwy projektowanych personalnie na potrzeby zastosowania klicznego”.

Problematykę recenzowanej pracy należy więc uznać jako trafną zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i ze względu na możliwości praktycznego zastosowania wyników badań w leczeniu implantologicznym dużych ubytków w obrębie twarzoczaszki.

2. Ocena części literaturowej pracy

Część literaturowa zamieszczona jest w rozdziale *PRZEGLĄD PIŚMIENICTWA* i została podzielona na trzy podrozdziały. W pierwszym Autorka opisuje metody przyrostowe mające zastosowanie w wytwarzaniu implantów. Oprócz ich wymienienia i omówienia zanalizowała je pod względem wad i zalet, dokładnie zostały omówione parametry pacy mające znaczący wpływ na powodzenie lub niepowodzenie procesu. W kolejnym podrozdziale scharakteryzowano tytan i jego stopy, głównie pod kątem właściwości jakie powinny spełniać materiały na wszczepiane implanty kostne. Autorka przedstawiła zagadnienie związane z biogodnością, korozją oraz poruszyła zagadnienia modyfikacji powierzchni tytanu. Ostatni podrozdział w części literaturowej porusza zagadnienia związane z biomechaniką i przenoszeniem obciążeń zgryzowych podczas procesów żucia. Na samym wstępie zaznaczyła różnice związane z wyężeniem w zagadnieniach mechanicznych, gdzie kryterium jest granica plastyczności lub wytrzymałość materiału, a biomedycznych, gdzie kryteria mechanicznym związane są z tolerancją tkanki, co nie koniecznie oznacza jej wytrzymałość mechaniczną. Doktorantka poruszyła w nim także kilka bardzo ważnych zagadnień mających wpływ na powodzenie implantologicznego leczenia ubytków kostnych oraz mających istotne znaczenie podczas projektowania indywidualnych implantów. Biorąc pod uwagę, że implanty mocowane

są do kości, na ich prawidłowe funkcjonowanie i trwałość zespolenia bardzo duży wpływ ma stan tych kości. Autorka zwróciła uwagę na fakt, że wytrzymałość kości jest zależna od wielu czynników takich jak, funkcja jaką pełnią kości wpływająca na ich strukturę, masę oraz objętościowa dystrybucję poszczególnych frakcji. Kolejnym czynnikiem jest zmiana gęstości i porowatości kości wraz z wiekiem. Jak podsumowała Doktorantka, duży odsetek niepowodzeń związany jest z implantami osadzonymi w kości o słabej jakości, z cienką blaszką korową. Wszystkie te czynniki predysponuje leczenie z zastosowaniem personalizowanych implantów po uprzednim wykonaniu zdjęć rentgenowskich i radiogramów okołowierzchołkowych. Ostatni podrozdział obejmuje zagadnienia związane z charakterystyką pełniącemu wiele funkcji układu stomatognatycznego i oddziaływaniem na siebie tkanek i narządów w obrębie twarzoczaszki. Podsumowaniem tej części jest stwierdzenie, że „... założenia modelowe w wielu pracach badawczych nie są zgodne z faktami anatomicznymi ...”, co można uznać za uzasadnienie podjęcia tematu badań prezentowanych w pracy. Tak przeprowadzona analiza piśmiennictwa jest jak najbardziej prawidłowa. Znajomość tych zagadnień jest niezbędna prawidłowego zaprojektowania uzupełnienia w postaci implantu personalizowanego.

Oceniając tę część pracy stwierdzam, że tak przedstawiona część literaturowa świadczy o posiadaniu przez Doktorantkę wystarczających podstaw teoretycznych do realizacji podjętego tematu.

3. Ocena części merytorycznej pracy

Część merytoryczna pracy przedstawiona została w rozdziale trzecim, zatytułowanym Badania własne. W podrozdziale 3.1 Doktorantka, na podstawie przeglądu literatury, formułuje dwa cele pracy. Cel naukowy, którym jest: „**przedkliniczna weryfikacja cech funkcjonalnych rozległych implantów żuchwy na podstawie badań własności materiałów na implanty wytwarzanych w technologii przetapiania laserowego z proszków tytanu i numerycznych badań symulacyjnych przenoszenia obciążeń zgryzowych, w których uwzględnia się aktywności mięśniowe towarzyszące wyzwoleniu maksymalnej skośnej jednostronnej siły zgryzowej przy asymetrycznym podparciu stawowym**”, oraz cel praktyczny, którym było „**opracowanie metodyki wytwarzania tytanowych implantów rozległych ubytków żuchwy projektowanych personalnie na potrzeby zastosowania klinicznego**”. Została także postawiona teza naukowa pracy w następującym brzmieniu: „**Symulacyjne badania metodą elementów skończonych (MES) nośności rozległego implantu żuchwy z przerwaniem jej ciągłości w warunkach przenoszenia jednostronnie**

działającej maksymalnej skośnej siły zgryzowej i asymetrycznego podparcia zgryzowego oraz dobór parametrów technologii selektywnego laserowego przetapiania tytanu umożliwiają wytworzenie spersonalizowanych implantów rozległych ubytków żuchwy.

W dalszej części tego rozdziału przedstawiono zakres pracy mający na celu udowodnienie postawionej tezy. W rozdziale 3.2 przedstawiono modele numeryczne wykorzystywane w dalszej analizie. Moim zdaniem wszystkie cztery realizowane warianty przenoszenia obciążeń i zespolenia żuchwy dobrano jak najbardziej prawidłowo. Oczywiście nie wyczerpują one wszystkich możliwych przypadków, ale w tego typu pracy jest to raczej niemożliwe. Są one jak najbardziej reprezentatywne. Także budowa siatki elementów skończonych, z lokalnymi zagęszczeniami w obszarach największych naprężeń, pozwala na wystarczającą dokładność analizy MES. Odnosząc się do tego rozdziału uważam, że jego tytuł nie powinien brzmieć „Numeryczne badania...”, tylko „Numeryczne symulacje ...”. Metodami MES nie wykonuje się badań. Ponadto jako modele wkrętów zespalających zastosowano uproszczony cylindryczny kształt bez gwintu. Rzeczywiście jest to duże uproszczenie. Nasuwa się pytanie: co by się stało, gdyby wkręty miały gwint – w aspekcie koncentracji naprężeń. Celem przeprowadzonych symulacji było oszacowanie stanu naprężeń, jaki może nastąpić w żuchwie ze spersonalizowanym implantem tytanowym, a stan tych naprężeń miał dostarczyć informacji, czy uzyskane właściwości mechaniczne tytanu po procesie SLM będą wystarczające. Mając to na uwadze, w dalszej części pracy Doktorantka skupiła się na badaniach otrzymanych próbek. W kolejnych podrozdziałach rozdziału trzeciego Doktorantka przedstawiła założenia optymalizacji procesu selektywnego przetapiania laserowego (LSM) oraz zakres i warunki badań zarówno materiałów wyjściowych, jak i próbek otrzymanych w procesie przetapiania. W rozdziale dotyczącym optymalizacji parametrów są one tylko wymienione. Uważam, że powinny być tutaj podane wartości, na których Autorka się koncentrowała, a także przesłanki, którymi się kierowała przy ich doborze. Tabela zawierająca zestawienie tych parametrów znajduje się dopiero w rozdziale 4 *OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ*. Badania otrzymanych próbek po przetapianiu laserowym są dobrane pod kątem warunków w jakich będzie pracował implant i jego ewentualnego zużycia. Są one typowe dla tego typu materiałów. Ich dobór oraz warunki prowadzenia badań są jak najbardziej prawidłowe i nie budzą wątpliwości. W pierwszej kolejności były to badania struktury i składu chemicznego – określono właściwości fizyczne, chemiczne i mechaniczne. Takie podejście uważam za słuszne z uwagi na to, że struktura i skład chemiczny materiału jest czynnikiem, który w decydujący sposób wpływa na jego właściwości. Ponadto pozwala na bardziej kompleksową ocenę badanego materiału, a tym

samym rozszerza możliwości wysuwania wniosków i wskazuje kierunki dalszej modyfikacji procesu selektywnego spiekania laserowego.

Na uwagę zasługuje tomografia komputerowa wytworzonego implantu, która, co jest bardzo istotne, oprócz określenia odchyłek wymiarowych gotowego elementu w stosunku do modelu wirtualnego, pozwoliła też na pokazanie jego pustek i wad wewnętrznych.

W rozdziale 4 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań i symulacji. Na podstawie wyników analizy MES wytypowano krytyczny przypadek obciążenia, określono najbardziej wyęteżone obszary oraz wartości naprężeń w tych obszarach. W kolejnym podrozdziale zamieszczono wyniki optymalizacji procesów selektywnego przetapiania laserowego i na ich podstawie wytypowano najkorzystniejsze parametry procesu. Podrozdział ten rozpoczyna się od omówienia wyników badań. Moim zdaniem, najpierw powinno się zaprezentować te wyniki, aby czytający się z nimi zapoznał, a dopiero potem je omówić. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono wyniki poszczególnych badań. Otrzymane wyniki pozwoliły na wybranie optymalnych parametrów procesu selektywnego spiekania laserowego w celu otrzymania spersonalizowanego implantu tytanowego. Podczas czytania tej części pracy nasuwają się pewne pytania, na które nie znalazłem odpowiedzi w pracy.

- Str. 95 „...można zauważyć, że Moduł Younga zwiększał się wraz ze zwiększeniem mocy lasera przy jednoczesnym zmniejszeniu prędkości skanowania” – co jest tego przyczyną?
- W badaniach trybologicznych mierzono zużycie i współczynnik tarcia. Jakie znaczenie ma współczynnik tarcia w tego typu elementach?
- Str. 148 „istnieje zależność pomiędzy kierunkowością wytwarzana próbek w technologii SLM, a ilością występującego tlenu i azotu w tytanie” – dlaczego?

Podsumowując tę część pracy, można stwierdzić, że Doktorantka rozwiązała prawidłowo postawiony problem badawczy, używając do tego celu adekwatnych technik badawczych, jednocześnie wykazując się znajomością ich wykonywania i stosowania. Wykonane eksperymenty nie budzą wątpliwości oraz zastrzeżeń merytorycznych, a ich interpretacja świadczy o zaawansowanym warsztacie naukowym Autorki, opanowaniu podstaw teoretycznych badanego problemu oraz znajomości stanu osiągnięć w obszarze wiedzy związanej bezpośrednio z realizowaną pracą. Lektura pracy pozwala mi stwierdzić, że Doktorantka wywiązała się z postawionego sobie zadania badawczego.

4. Zagadnienia polemiczne i uwagi

Oprócz niewątpliwych zalet rozprawa, jak każda tego typu praca, zawiera pewne nieścisłości, a także sformułowania i ujęcia, które mogą być przez recenzenta postrzegane w inny sposób lub w formie rozszerzonej, a obowiązkiem ciążącym na recenzencie jest zwrócić na nie uwagę. Część z nich została już wcześniej zasygnalizowana podczas oceny części merytorycznej pracy i nie ma potrzeby ich tutaj powtarzać, jednak z obowiązku recenzenta kilka zostanie wymienionych.

- Deklarowane wielkości ziaren proszku tytanu (15 – 45 μm) nie zgadzają się z wielkościami ziaren obserwowanymi za pomocą SEM i przedstawionymi na fotografiach,
- W tabeli 19 gdzie zamieszczono skład chemiczny Ti jest obecny wolfram w ilości 0,6 – 0,7%, dlaczego nie uwidocznił się w badaniach EDS (może zbyt mało impulsów do tej analizy)?
- Analiza porowatości metodą izotermy adsorpcji i desorpcji wykazała wielkość porządku kilku nanometrów, natomiast pory na obrazach mikroskopowych mają wielkość rzędu mikrometrów – skąd ta różnica?
- Nie do końca zgadzam się z opisami na rysunku 122. Np. jasne elementy opisane jako tlenek są moim zdaniem zaokrągleniami, czy zaznaczone pęknięcia są naprawdę pęknięciami zmęczeniowymi?
- Przy badaniach wytrzymałościowych, pomiarach twardości Autorka operuje stwierdzeniami, że otrzymano większe lub mniejsze wartości. Uważam, że jest to nieuprawnione, ponieważ nie wykonano analizy statystycznej.

Chciałbym podkreślić, że przytoczone uwagi w niewielkim stopniu obniżają wartości pracy i należy je traktować jako wskazówki na przyszłość, szczególnie w kontekście publikowania wyników pracy w czasopismach naukowych.

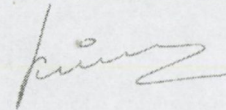
5. Ocena końcowa

Przytoczone uwagi tylko w niewielkim stopniu obniżają moją pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy. Doktorantka zrealizowała w sposób wystarczający postawione sobie cele, a tym samym zrealizowała zakres merytoryczny pracy, której tematyka jest ważna zarówno w aspekcie poznawczym, jak i klinicznym. Wykazała się przy tym odpowiednią wiedzą teoretyczną w zakresie dyscypliny Inżynieria Materiałowa, a zastosowane metody badawcze wskazują na Jej umiejętność w samodzielnym prowadzeniu eksperymentów oraz

opracowania i analizy wyników, a także wyciągania wniosków. **Przedstawione w pracy rozwiązanie dotyczące technologii wykonywania spersonalizowanych implantów są oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego wnoszącym wkład w dyscyplinę Inżynieria Materiałowa.**

Wniosek końcowy

Na podstawie powyższej opinii o rozprawie doktorskiej mgr inż. mgr inż. Magdaleny Zorychty-Tomsi pt.: „*Laserowe przetapianie proszków SLM w zastosowaniu na implanty ubytków zuchwy w oparciu o numeryczne badania przenoszenia obciążeń zgryzowych*” stwierdzam, że wykazała się ona wiedzą umożliwiającą prowadzenie samodzielnych badań naukowych, a oceniana praca jest samodzielnym i oryginalnym rozwiązaniem problemu badawczego. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska spełnia warunki stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 565 ze zm. Dz. U z 2005 r, nr 164 poz. 1365). Przedkładam więc Wysokiej Radzie Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej wniosek o dopuszczenie mgr inż. Magdaleny Zorychty-Tomsi do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Leszek Klimek