

Prof. dr hab. inż. Jan R. Dąbrowski

Białystok, 2019.04.12

Politechnika Białostocka

Wydział Mechaniczny

ul. Wiejska 45 c

15-351 Białystok

e-mail: j.dabrowski@pb.edu.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Siwka
pt. „Model funkcjonalny ucha środkowego i wewnętrznego w ujęciu materiałowym”**

1. Tematyka rozprawy

Narząd słuchu jest złożonym układem biologicznym, stanowiącym jeden z najważniejszych zmysłów organizmu, odpowiedzialnym za odbiór i przetwarzanie wrażeń akustycznych. Najistotniejsze składowe anatomiczne ucha ludzkiego, to: ucho zewnętrzne, ucho środkowe i ucho wewnętrzne. Fale dźwiękowe odbierane przez małżowinę są wzmacniane i kierowane do przewodu słuchowego zewnętrznego. Przewód słuchowy zamykany jest błoną bębenkową w uchu środkowym. Wzmocniona fala dźwiękowa wprawia w drgania błonę bębenkową, które przenoszone są na łańcuch kosteczek słuchowych w obrębie ucha środkowego (młoteczek, kowadełko, strzemiączko) i dalej transmitowane do ucha wewnętrznego, gdzie są zamieniane na impulsy nerwowe.

Upośledzenie słuchu może mieć charakter niedosłuchu przewodzeniowego – spowodowanego zmianami w obrębie ucha zewnętrznego i środkowego, bądź niedosłuchu odbiorczego – w wyniku uszkodzenia ucha wewnętrznego i nerwu słuchowego. Niezbędna interwencja chirurgiczna obejmuje najczęściej zabiegi:

- operacji rekonstrukcyjnych,
- wszczepienia protezy,
- wszczepienia implantu ślimakowego.

Zabiegi te są zwykle skomplikowane, z uwagi na potrzeby odtworzenia złożonych i dalece niepoznanych zjawisk mechanicznych, hydrodynamicznych i elektrycznych, zachodzących wewnątrz ucha. Dotychczasowa wiedza w tym zakresie ma w większości charakter jakościowy i dotyczy poszczególnych procesów elementarnych. Brak jest natomiast wystarczających danych, zwłaszcza w odniesieniu do relacji pomiędzy poszczególnymi zjawiskami i procesami, co ułatwiłoby przygotowania właściwych scenariuszy i procedur leczenia. Możliwość korzystania z takich narzędzi wspomagających korzystnie wpłynęłoby

na obniżenie poziomu niepowodzeń, a tym samym na efektywność procesu przywracania słuchu i finalnej jakości słyszenia.

W tym kontekście uważam, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i ważna w aspektach poznawczym i użytecznym.

2. Ocena formalna i merytoryczna

Praca doktorska stanowi obszernie studium problemu, które zostało udokumentowane na 158 stronach rękopisu. Zawiera 232 rysunki, 27 tabel i 87 pozycji bibliograficznych. Praca jest napisana w języku polskim. Składa się z następujących rozdziałów:

1. Wstęp
2. Fizjologia słuchu i proces słyszenia
3. Schorzenia słuchu
4. Cel pracy
5. Stan zagadnienia
6. Model parametryczny
7. Ucho środkowe, analiza transmisji akustycznej
8. Implant ucha środkowego
9. Analiza implantacji ucha wewnętrznego
10. Analiza hydrodynamiczna ucha wewnętrznego
11. Podsumowanie i wnioski końcowe

Wstęp rozprawy poprzedzony jest podziękowaniem oraz streszczeniem w języku angielskim i polskim. Dane bibliograficzne są starannie dobrane – prawie 60% cytowanych pozycji jest opublikowana po 2010 roku, co stanowi bardzo dobry wskaźnik udziału publikacji „aktualnych”. Układ pracy jest przejrzysty i stanowi logiczną całość, a właściwie zaplanowany i obszerny program badawczy został w pełni zrealizowany. Na podkreślenie zasługuje zwarty układ rozprawy, z zachowaną właściwą proporcją zawartości i objętości pracy.

Tytuł rozprawy: “Model funkcjonalny ucha środkowego i wewnętrznego w ujęciu materiałowym” został sformułowany poprawnie i w pełni pokrywa się z tematyką przedstawioną w pracy. Natomiast cel pracy, w postaci obszernego opisu (s.24-27), jest przedstawiony nieprecyzyjnie i mało przejrzysto. Aczkolwiek, czytelnik bez trudności

- współczynniki tłumienia układu.

Niewątpliwie jednym z najcenniejszych elementów pracy jest przygotowanie modeli ucha środkowego i wewnętrznego, stanowiących podstawę dla poprawnych analiz numerycznych. Etapy budowy tych modeli obejmowały: badania preparatów biologicznych, odwzorowanie geometryczne i tworzenie modeli parametrycznych z wykorzystaniem techniki MES. Geometrię analizowanych obszarów ucha środkowego i wewnętrznego, w postaci trójwymiarowych rekonstrukcji uzyskiwano na podstawie analizy zdjęć z tomografii komputerowej. Autor podkreśla przy tym wkład i zasługi dr inż. Jakuba Jaroszewicza (WIM PW), co jest niewątpliwie miłym akcentem ze strony Autora, aczkolwiek niekoniecznie koniecznym formalnie. Zbyt skromne są dane dotyczące parametrów badań tomograficznych, np. kąt skanowania, artefakty pierścieniowe, przygotowanie preparatów kostnych.

Opracowane modele parametryczne analizowanych struktur należy uznać za zaawansowane, przygotowane starannie i wystarczająco szczegółowo. Stanowiły bardzo dobre narzędzie dla prowadzonych badań symulacyjnych. Analiza harmoniczna drgań opracowanego modelu ucha, w trajektorii przenoszenia dźwięku przez błonę bębenkową i kosteczki słuchowe do ucha wewnętrznego, potwierdziła jego wysoki stopień zaawansowania i przydatność w zakresie prowadzonych badań symulacyjnych. Poprawność zbudowanych modeli została również potwierdzona wysoką zgodnością wyników badań amplitudy drgań błony bębenkowej i podstawy strzemiączka, w porównaniu z danymi eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze.

W badaniach symulacyjnych transmisji akustycznej w obrębie ucha środkowego obserwowano duży wpływ parametrów materiałowych elementów składowych. Dane materiałowe modelu ucha środkowego zamieszczone są w tablicy 2 (s.46). Wątpliwości mogą budzić zróżnicowane gęstości materiałów składowych młoteczka (rękojeść, szyjka, główka) i kowadelka (główka, odnoga długa), przy jednocześnie niezmiennych parametrach wytrzymałościowych (moduł Younga, liczba Poissona).

W pracy dokonano analizy czułości modelu ucha środkowego na zmiany wybranych parametrów materiałowych i obciążenia, uzyskanych z badań eksperymentalnych i przyjętych parametrów referencyjnych. Wyniki tych analiz wskazały na:

- zasadność przyjęcia izotropowego modelu błony bębenkowej,
- brak wpływu obciążenia na współczynnik wzmocnienia akustycznego,
- istotny wpływ tłumienia na reakcję układu,
- wzrost sztywności układu (moduł Younga) prowadzi do zmniejszenia amplitudy drgań struktur ucha środkowego,
- wpływ gęstości składowych ucha środkowego na reakcję układu,
- wpływ sztywności ścięgien na siły reakcji i wzmocnienie ciśnienia akustycznego.

W podsumowaniu oceny tej części pracy należy stwierdzić, że:

- opracowany model należy uznać za zaawansowany, dobrze odwzorowujący dynamiczne zachowanie ucha środkowego,

- model wykazuje największą wrażliwość na zmiany tłumienia i sztywności poszczególnych komponentów ucha.

Cennymi walorami naukowymi i użytkowymi zbudowanego modelu są możliwości jego użycia do badań symulacyjnych zmian chorobowych w obrębie ucha środkowego, np. otosklerozy bądź rozrostu błony bębenkowej w obszarach perforacji.

W dalszej części rozprawy przedstawione są wyniki badań implantacji w obrębie ucha środkowego i wewnętrznego. Implanty ucha środkowego stosuje się w przypadku niedosłuchu przewodzeniowego, z zastosowaniem implantu aktywnego lub tzw. pasywnej protezki. W rozprawie przedstawiono wyniki badań pasywnej protezki, której celem było zastąpienie uszkodzonych stawów i fragmentów kosteczek stawowych. Zaproponowano dobór materiałów i konstrukcję implantu. W badaniach modelowych oceniano wpływ właściwości wybranych biomateriałów, głównie gęstości oraz parametrów mechanicznych (moduł sprężystości wzdłużnej, liczba Poissona) na funkcje słuchowe ucha.

W sposób syntetyczny opisane zostały kryteria wyboru 3 biomateriałów: tytanu (grade 2), stopu tytanu TNTZ (TiNbTaZr), stali austenitycznej bezniklowej (BioDur 108). Wybór tych biomateriałów wydaje się być zgodny z aktualnymi prognozami rozwoju stopów implantacyjnych. Dąży się do eliminacji toksycznego niklu w implantacyjnych stali austenitycznych oraz szkodliwych dodatków stopowych: glinu i wanadu, w komercyjnych stopach tytanu. Szkoda, że pominięto rozpowszechnione w chirurgii rekonstrukcyjnej (i bardzo perspektywiczne w opinii recenzenta) implantacyjne stopy kobaltu. Zastanawia wybór czystego tytanu, ze względu na relatywnie niskie parametry wytrzymałościowe ($R_m \sim 500\text{MPa}$). Trudno też zgodzić się z opinią Autora, że Wartość modułu Younga badanych stopów tytanu (60 GPa - zgodnie z Tablicą 19, s.91) jest zbliżona do modułu Younga kości (s. 90²⁵), który dla kości korowej przyjmuje się na poziomie 5-10 GPa. Generalnie, brak szerszej palety właściwości mechanicznych omawianych biomateriałów, np. twardość, parametry wytrzymałościowe (R_m , R_e), trwałość zmęczeniowa, może obniżać jakość merytoryczną zawartych w pracy opisów i konstatacji. Można również zapytać o dostępność handlową badanej stali Biodur 108 i stopu tytanu TNTZ.

Otrzymane wyniki badań potwierdziły wysoką przydatność opracowanych modeli do badań symulacyjnych i oceny patologicznych zmian w obrębie ucha środkowego oraz, w szczególności, do projektowania i doboru implantów.

Niedosłuch odbiorczy oraz głuchota wymagają wszczęcia w obrębie ucha wewnętrznego implantu ślimakowego. Implant taki składa się z odbiornika, przetwornika oraz wiązki elektrod wprowadzanych bezpośrednio do ucha wewnętrznego. Zabieg implantacji polega na dotarciu do ślimaka i umieszczeniu w nim elektrody stymulacyjnej. Ze względu na skomplikowany charakter zabiegu chirurgicznego i związaną z tym możliwość uszkodzenia delikatnych struktur tkankowych ucha wewnętrznego, dąży się do minimalizacji wywieranych sił. Niezwykle istotnymi czynnikami tych zabiegów są opory ruchu, początkowy kąt wprowadzania części aktywnej implantu oraz jego końcowa pozycja w kanale ślimaka. Czynniki te stanowiły determinantę prowadzonych badań symulacyjnych implantacji. Jako model implantu użyto komercyjnej elektrody Flex 38, firmy Medel. Właściwości

materiałowe elementów implantu uzyskano z badań własnych oraz dostępnych baz danych (JAHM software). Na podstawie wyników badań tomograficznych opracowano model wybranego obszar ślimaka – schodów bębienka, w którym umieszczano implant.

Analiza danych literaturowych oraz uzyskane wyniki badań symulacyjnych, potwierdziły wpływ stosowanej siły na głębokość przemieszczenia implantu. Znaczącym wynikiem naukowych tych badań stały się konstatacje dotyczące roli procesów tarcia w tych zabiegach. Wywód Autora, w postaci zalecenia stosowania środków smarnych jest tego logiczną konsekwencją o znaczeniu użytecznym. Można w tym kontekście zaproponować rozwiązania i praktyczne wskazania obniżenia tarcia, np. stosowane w zabiegach wprowadzania stentów kardiologicznych.

Bardzo cenne informacje, o charakterze poznawczym i użytecznym, dostarczają wyniki badań charakterystyk hydrodynamicznych ucha wewnętrznego, zawarte w końcowym rozdziale rozprawy (rozdział 10). Dla tych celów, na podstawie danych tomograficznych, z wykorzystaniem technik MES opracowano zaawansowany model ucha wewnętrznego. Podobnie jak w przypadku modelu ucha środkowego (rozdział 7) przeprowadzona została analiza czułości modelu na zmiany wybranych parametrów materiałowych i obciążenia. Otrzymane wyniki badań wskazują na wysoki poziom zaawansowania opracowanego modelu, w kontekście odwzorowania czynności ucha wewnętrznego.

3. Uwagi szczegółowe i komentarze

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Siwka przedstawia obszerny materiał badawczy i jest napisana z dużą starannością i dbałością o szczegóły. Mimo to posiada również niedociągnięcia i nieścisłości.

A. Błędy językowe i edytorskie

- Autor nie ustrzegł się nielicznych błędów językowych, głównie interpunkcyjnych (np. s.12¹⁰, 22^{4,5}, 98³),
- nieprecyzyjne wyrażenia, np. (cytat) „Szczegółową budowę implantu opisano na Rysunku 12” (na rysunku brak jest opisu),
- niepełne opisy osi, słaba czytelność rysunków (np. rys.57, s.62; rys.66, s.68; rys.67-68, s.69; rys.38, s.45),
- powtórzenia rysunków (rys.7, s.15; rys.18, s.35),
- zbędna tablica 15, s.83 (identyczne wartości parametrów dla wskazanych materiałów).

B. Inne uwagi

- niezgodne ze standardami SI wielkości fizyczne, np. ciężar właściwy (s.90¹⁴),
- różne oznaczenia tych samych wielkości fizycznych i zjawisk, np. współczynnik tarcia „ μ ” (s. 105¹³) oraz „ v ” (rys. 137, s.110),
- niejednolita terminologia, np. „fala biegnąca” i „fala wędrująca” (s.18^{3,4}),
- zróżnicowane parametry materiałowe płynów ślimakowych: lepkość dynamiczna (tablica 26, s.122) i lepkość kinematyczna (s.125),
- brak oceny statystycznej wyników badań (np. Tablica 1, s.37),

- nieprecyzyjne konstatacje, np. (cytat) „Uwzględnienie w analizie współczynnika tarcia prowadzi do pojawienia się oporów ruchu” (s.113⁷), czy też „wzrost wartości współczynnika tarcia prowadzi do wzrostu oporów ruchu” (s.113¹³). Należy przy tym wyjaśnić, że współczynnik tarcia (bezwymiarowy parametr obliczeniowy) jest miarą oporów ruchu.

4. Podsumowanie

Tematyka rozprawy dobrze wpisuje się w aktualne trendy badawcze w zakresie inżynierii biomateriałów. Wnosi istotne walory poznawcze i użyteczne w obszarze implantologii narządu słuchu. Założone cele naukowe zostały w pełni osiągnięte. Wyniki badań są dobrze udokumentowane i poprawnie analizowane. Autor wykazał się rozległą wiedzą oraz dobrym przygotowaniem merytorycznym i umiejętnościami do samodzielnego planowania i prowadzenia eksperymentów naukowych. Zawarte w pracy analizy i konstatacje świadczą o dużej dojrzałości naukowej Autora. Wskazane usterki i niedociągnięcia, w większości o charakterze dyskusyjnym, nie wpływają na wysoki poziom merytoryczny i mają bardzo pozytywną ocenę recenzowanej pracy.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Siwka stanowi oryginalne rozwiązanie wykonane przez Autora, pod opieką promotorów, ustalonego zagadnienia naukowego. Wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie naukowej *inżynieria materiałowa* i umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

Na podstawie przedłożonej recenzji stwierdzam, że rozprawa naukowa mgr inż. Marcina Siwka, zatytułowana: „Model funkcjonalny ucha środkowego i wewnętrznego w ujęciu materiałowym”, spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie recenzowanej pracy.

Uzasadnienie:

Szeroki zakres i złożoność tematyki składają się na ambitny program badawczy recenzowanej pracy. Na podkreślenie zasługuje koncepcja i strategia badawcza rozprawy: ambitna, spójna i logiczna. Zamieszczony w pracy materiał ilustracyjny oraz rzetelna analiza danych literaturowych, dobrze wspierają zawarte w pracy opisy, konstatacje i sformułowane wnioski końcowe. Ich wartość naukową i walory aplikacyjne, zwłaszcza w zakresie implantologii narządu słuchu, oceniam wysoko.


(Prof. dr hab. inż. Jan R. Dąbrowski)