

Prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
ul. Żwirki i Wigury 4, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 18 kwietnia 2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina SIWKA

pt.: „*Model funkcjonalny ucha środkowego i wewnętrznego w ujęciu materiałowym*”.

**Podstawa opracowania recenzji – pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej z dnia 4.02.2019 r.**

Dynamiczny rozwój techniki na przełomie 20. i 21. wieku determinuje otoczenie i środowisko człowieka oraz w dużym stopniu oddziałuje na jego organizm. Skutkuje to m.in. zwiększeniem schorzeń układu słuchu człowieka. Nastąpiło bowiem w ostatnich kilku dziesiątkach lat szczególne nasilenie wzrostu stanów chorobowych, również zmian patologicznych narządów słuchu. Jednocześnie w tym obszarze medycyny występuje wyjątkowo szerokie stosowanie implantów, często z pionierskimi rozwiązaniami. Szczególne zastosowanie w początkowym stadium opracowania implantów miały materiały metaliczne, przede wszystkim tytan i jego stopy. Spełniały bowiem w stopniu najwyższym podstawowe kryterium medycyny – biogodności z płynami organicznymi człowieka, największe spośród materiałów metalicznych.

Użytkowanie implantów medycznych wprowadziło dodatkowe kryteria doboru ich materiałów z wyodrębnieniem zarówno układów budowy człowieka, m.in. słuchu, kostnego, krwionośnego, jak również właściwości funkcjonalnych ich poszczególnych elementów. Ich właściwości są zbliżone do właściwości materiałowych tkanek przejętych przez implanty i spełniają ich funkcje w układzie. Prowadzone są prace badawcze skoncentrowane na nowych metodach wytwarzania implantów z materiałów metalicznych, również polimerowych, spełniających prognozowane wymagania zarówno właściwości fizycznych i mechanicznych, jak również funkcjonalnych. Rozwój nowych technik wytwarzania, także wyposażenia aparaturowego, umożliwia konstytuowanie w szerokim zakresie morfologii składników fazowych mikrostruktury materiałów implantów, jak również ich właściwości użytkowych. Dlatego szczególne znaczenie ma

obecnie charakteryzacja właściwości materiałowych tkanek poszczególnych układów człowieka zastępowanych przez implanty lub współpracujących z wprowadzonymi implantami. Dotyczy to również szczególnie złożonego ucha ludzkiego i poszczególnych elementów narządu słuchu. Wymagają uwzględnienia w konstrukcji implantów unikatowych właściwości zarówno tkanek układu, jak również ich właściwości funkcjonalnych – użytkowych. Dlatego w mojej ocenie zagadnienia naukowo-badawcze podjęte w opiniowanej rozprawie doktorskiej są aktualnymi w inżynierii materiałowej oraz w medycynie i są w pełni uzasadnionymi.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Siwka pt. „*Model funkcjonalny ucha środkowego i wewnętrznego w ujęciu materiałowym*” dotyczy określenia stopnia oddziaływania właściwości materiałowych tkanek ucha ludzkiego oraz właściwości fizycznych materiałów implantów na pełnienie przez nich funkcji słyszenia.

W pracy przeprowadzono analizę wpływu efektów wszczepienia implantów układu słuchu oraz zjawisk mechanicznych i hydromechanicznych występujących w procesie słyszenia. Stosowano metody symulacji numerycznej poszczególnych występujących charakterystycznych zjawisk w procesie słyszenia z uwzględnieniem danych materiałowych uzyskanych w badaniach doświadczalnych.

Analiza aktualnego stanu zagadnienia w tematyce rozprawy wskazuje, że na działanie złożonego układu słuchu oddziałuje wiele czynników biologicznych, fizycznych i mechanicznych. Determinują one również właściwości akustyczne elementów tego układu człowieka. Ustalenie wartości wielu czynników dotyczących właściwości materiałowych poszczególnych elementów narządu słuchu jest trudne, zwykle niemożliwe (dehydratacja tkanek). Dlatego przyjęcie hipotezy badawczej przez Autora rozprawy, że jest możliwe określenie zakresu zmienności wartości poszczególnych czynników, przede wszystkim uwzględnienie właściwości tkanek oraz kształtu i rozmiarów indywidualnych cech anatomicznych pacjenta w procesach symulacji numerycznej dla opracowanych i przyjętych modeli fizycznych elementów narządu słuchu, uważam za uzasadnione zarówno ze względów poznawczych, jak również aplikacyjnych.

Uzyskanie potwierdzenia słuszności sformułowanych głównych celów rozprawy – określenie właściwości fizycznych – materiałowych poszczególnych elementów układu słuchu – wymagało kompleksowej analizy wyników prowadzonych procesów symulacji numerycznej metodą elementów skończonych dla opracowanych modeli elementów ucha ludzkiego. Przedstawione w rozprawie doktorskiej wyniki wykonanych badań w Zakładzie Projektowania Materiałów oraz w Instytucie Fizjologii i Patologii Słuchu w szerokim zakresie stanowią solidną podstawę do stwierdzenia dużego stopnia poprawności opracowanych i przyjętych modeli, także scharakteryzowanych zjawisk fizycznych i biologicznych determinujących proces słyszenia zarówno w przypadkach uszkodzenia narządów, jak również w obecności wprowadzonych implantów. Prawdłowo zdefiniowano problemy naukowe i określono podstawowe narzędzia oraz metodykę

realizacji badań dla ich rozwiązania. Stąd uznaję, że spełnione zostały warunki formalne ustalone dla rozprawy doktorskiej, jako naukowej pracy kwalifikowanej.

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Siwka podzielono na 11 rozdziałów i wykaz 87 pozycji literatury. Zawiera również 232 rysunki i 27 tablic. W części 1. rozprawy (rozdziały: 1. *Wstęp* i 2. *Fizjologia słuchu i proces słyszenia* oraz 3. *Schorzenia słuchu*) scharakteryzowano schorzenia narządów słuchu oraz stosowane metody terapii, również anatomię ucha ludzkiego z uwzględnieniem występujących zjawisk fizycznych (rodzaj i częstotliwość fali dźwiękowych). Wskazano najczęstsze schorzenia słuchu i sposoby ich leczenia przez wprowadzenie implantów. Treści zawarte w tych rozdziałach, także analiza danych literaturowych oraz badań doświadczalnych Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu stanowiła podstawę do charakterystyki stanu zagadnienia i sformułowania celu rozprawy (rozdz. 5) – ustalenie efektywności działania implantów oraz ich wpływ na funkcjonowanie ucha poprzez analizę interakcji mechanicznych pomiędzy tkankami ucha i wprowadzonymi implantami słuchowymi.

W rozdziale 6 – 11 przedstawiono wyniki badań własnych. Rozdział 6. (*Model parametryczny*) dotyczy opracowania fizycznego modelu układu słuchowego z uwzględnieniem jego cech fizycznych i biologicznych, także geometrycznych uzyskanych w tomografii komputerowej. Szczegółowy model tomograficzny ucha środkowego i wewnętrznego (błona bębenkowa, młoteczek, kowadełko i ślimak) stanowiły podstawy do symulacji numerycznej procesu słuchu dla zmiennych szczegółów anatomicznych oraz dla różnych typów implantów i ich rozmiarów.

Kolejny 7. rozdział (*Ucho środkowe – analiza transmisji akustycznej*) dotyczy charakteryzacji zjawisk fizycznych zapewniających transmisję dźwięków od środowiska zewnętrznego do ucha wewnętrznego i ich zamiany na impulsy nerwowe. Autor rozprawy dokonał głębokiej analizy stanu wiedzy w tym obszarze zarówno z zakresu biologii i medycyny, jak również fizyki i nauki o materiałach. Była podstawą do opracowania i przyjęcia modelu transmisji akustycznej oraz ustalenia właściwości fizycznych – modułu Younga, liczby Poissona i gęstości tkanek błony bębenkowej, młoteczka, kowadełka i strzemiączka. Uwzględniono zmiany wielkości fizycznych tkanek ze względu na ich funkcję, rozmiary i masę. Omówiono pracę tkanek – ścięgien i mięśni w zależności od rodzaju obciążenia wywołanego oddziaływaniem fali dźwiękowej i czynnikami wewnętrznymi – funkcjonalność ucha środkowego. Stanowiło to podstawy do analizy harmonicznego drgań dla przyjętego modelu ucha – układ drgający o jednym stopniu swobody. Dokonano oceny poprawności zbudowanych modeli w prowadzonej analizie porównawczej określonych wartości amplitudy drgań błony bębenkowej i podstawy – strzemiączka, z wyników eksperymentalnych i danych literaturowych. Przeprowadzono analizy czułości układu opracowanego dla ucha środkowego dla niektórych stałych materiałowych i obciążenia charakteryzowanych przyjętymi wartościami referencyjnymi. Uwzględniono, w prowadzonej analizie – referencyjne wartości stałych materiałowych

tkanek, model ortotropowy błony bębenkowej, obciążenie (ciśnienie akustyczne), tłumienie (współczynnik tłumienia). Opracowany model umożliwia jego modyfikowanie i zastosowanie do symulacji numerycznej zmian chorobowych ucha środkowego. Uwzględniono, w wykonanej analizie, zmiany chorobowe cechujące ucho środkowe dla otosklerozy i zwiększenia grubości błony bębenkowej. Jednocześnie wykazano możliwość zastosowania opracowanego modelu dla symulacji numerycznej zewnętrznego kanału słuchowego i jamy bębenkowej i przez to do rozszerzenia na inne przypadki chorobowe, m.in. wysięk lub perforacja błony bębenkowej. Jest to niewątpliwie duże osiągnięcie Doktoranta.

Tematyka rozdziału 8. (*Implant ucha środkowego*) i 9. (*Analiza procesu implantacji ucha wewnętrznego*) obejmuje charakterystykę stopnia oddziaływania implantów w zależności od rodzaju ich materiałów (hydroksyapatyt, stal austenityczna, tytan i stopy tytanu) oraz aplikacji implantu. Wykonana analiza uzyskanych wyników symulacji numerycznej wskazuje, że opracowane modele pozwalają na prowadzenie symulacji umożliwiającej ocenę stopnia zmiany patologicznej i stąd prawidłowy dobór implantów słucho. Ustalono jednocześnie w rezultacie prowadzonej analizy zespół charakterystycznych czynników wpływających na przebieg zabiegu wprowadzenia implantu – określenie głębokości jego wprowadzenia i uwzględnienia tarcia.

W rozdziale 10. (*Analiza hydrodynamiczna ucha wewnętrznego*) scharakteryzowano budowę ślimaka ucha i jego rolę w układzie słucho. Jest najwrażliwszym elementem ucha – wykrywa dźwięki oraz wyodrębnia poszczególne ich częstotliwości. Doktorant opracował model ślimaka o złożonej geometrii na podstawie wykonanych pomiarów tomograficznych. Podkreślić należy trudność w przygotowaniu modelu i w prowadzenia procesów symulacji numerycznej. Uwzględniono bowiem zarówno stałe materiałowe jego tkanki i jego geometrię, jak również zjawiska występujące w zawartej cieczy (mechanika płynów) oraz stopień odkształcania elementów ślimaka. Analiza uzyskanych wyników symulacji numerycznej wskazuje na poprawność opracowanych modeli. Zgodnie z przyjętymi założeniami prawidłowo odwzorowują zachowanie ucha wewnętrznego.

W rozdziale 11. – *Podsumowanie i wnioski końcowe* doktorant, mgr inż. Marcin Siwek, stwierdza, że analiza wyników badań wykazała, że stanowią uzasadnienie o prawidłowości przyjętych założeń o charakterze biologicznym – fizycznym i mechanicznym w procesie opracowania modeli funkcjonalnych ucha środkowego (ze szczególnym uwzględnieniem stanu materiałowego tkanek), także charakteryzującego oddziaływania występujących schorzeń lub wprowadzenia implantu. Jednocześnie doktorant wyraża opinię, że rozwiązanie postawionych zagadnień w podjętej tematyce umożliwia sformułowanie kierunków dalszych badań zarówno w zakresie aplikacji uzyskanych wyników, jak również rozszerzenia opracowanego modelu o oddziaływaniu innych czynników biologicznych, chorobowych i środowiskowych. W mojej ocenie

stanowi to wartość dodaną do poziomu rozprawy i rezultatów prowadzonej analizy wyników badań.

Analiza treści rozprawy doktorskiej – wyników badań własnych i ich analiza, pozwala stwierdzić, że mgr inż. Marcin Siwek opanował szeroką wiedzę w dziedzinie nauk medycznych fizycznych i technicznych. Świadczy o tym zakres rozważań teoretycznych i badań doświadczalnych przedstawionych w rozprawie. Opanował na wysokim poziomie metodykę prawidłowego opracowania modeli opisujących procesy słuchu, także z uwzględnieniem stanów patologicznych i chorobowych oraz po wprowadzeniu implantów. Podjął się z powodzeniem trudnego zadania – określenia stałych materiałowych tkanek poszczególnych elementów ucha ludzkiego. Były niezbędne do prowadzenia prawidłowej symulacji numerycznej procesu słyszenia. Dużym walorem opiniowanej rozprawy jest uwzględnienie wyników badań medycznych i biologicznych, dotyczących zarówno stanów patologicznych i chorobowych, jak również oddziaływania wprowadzonego implantu.

Analiza wyników tych badań potwierdza w pełni prawidłowość przyjętych założeń, również zakresu badań dla uzyskania sformułowanego celu rozprawy. Oceniam, że mgr inż. Marcin Siwek prowadzi dyskusję wyników prawidłowo i na wysokim poziomie. Potwierdza swoją szeroką wiedzę przez dokonanie właściwej ich oceny oraz wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązania trudnych interdyscyplinarnych problemów badawczych.

W rozprawie przyjęto poprawną terminologię i napisana jest na dobrym poziomie. Stwierdzone w tekście usterki zaznaczyłem i wskazałem Autorowi. Nie umniejszają poziomu pracy, jednak wymagają ich rozważenie w planach publikacyjnych z zakresu rozprawy.

Doktorant, mgr inż. Marcin Siwek, zrealizował założony cel badań. Uzyskał wyjątkowo wiele wyników w prowadzonych w szerokim zakresie badaniach o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym. Stwierdzam, że przyjęcie szerokiego zakresu badań wymagało głębokiej interdyscyplinarnej wiedzy z obszaru nauki o materiałach, medycyny, biologii, fizyki i mechaniki – dynamiki oraz umiejętności w prowadzeniu kompleksowej ich analizy na wysokim poziomie. Uzyskał potwierdzenie o prawidłowości przyjętych założeń dla opracowania modelu funkcjonalnego ucha środkowego i wewnętrznego. W wykonanych procesach symulacji numerycznej uwzględnił czynniki biologiczne, materiałowe i środowiskowe. Sformułowane wnioski, zarówno z poszczególnych etapów prac badawczych, jak również w przedstawionym podsumowaniu mają silne uzasadnienie w wykonanych doświadczeniach i obliczeniach oraz stanowią podstawę do kontynuacji badań w wielu zakresach nowatorskich o pionierskim ujęciu w zakresie modelowania fizycznego elementów układu słuchu oraz realizacji procesów symulacji numerycznej procesu słyszenia.

Stwierdzam w podsumowaniu, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Siwka prezentuje wysoki interdyscyplinarny poziom naukowy. Stwierdzam oryginalne opracowanie zagadnień określonych w jej celu. Wprowadza także szeroki zakres nowości w zakresie modelowania i symulacji numerycznej procesu słuchu ze szczególnym uwzględnieniem właściwości fizycznych – stałych materiałowych tkanek poszczególnych – wyodrębnionych elementów układu słuchu oraz stopnia oddziaływania wprowadzonych implantów. Jednocześnie uznaję rozprawę za wyróżniającą się zarówno ze względu na jej poziom naukowy, jak również szeroki interdyscyplinarny zakres badań wykonanych na wysokim poziomie. Spełnia w mojej ocenie wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. Stąd mój wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Marcina Siwka do publicznej obrony rozprawy przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

