

doc. dr hab. Jerzy Rojek  
Zakład Metod Komputerowych  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Świętokrzyska 21  
00-049 Warszawa

Warszawa, 29.05.2009 r.

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosza Nowaka**  
**pt. „Modelowanie dynamiki układu kość-implant. Badanie numeryczne i**  
**eksperymentalne”**

**1. Ogólna charakterystyka pracy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Bartosza Nowaka pt. „Modelowanie dynamiki układu kość-implant. Badanie numeryczne i eksperymentalne” została zrealizowana pod kierunkiem dr. hab. inż. Mariusza Kaczmarka, profesora Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy. Praca, o łącznej objętości 165 stron, składa się z 10 rozdziałów, 3 dodatków oraz bibliografii obejmującej 126 pozycji.

Przedmiotem pracy jest numeryczne i eksperymentalne badanie własności dynamicznych układu kości z protezą na przykładzie kości udowej z protezą stawu biodrowego. Celem pracy, określonym przez Autora w rozdziale 2, jest ocena przydatności metod drganiowych w diagnostyce stanu połączenia kości z implantem.

W rozdziale 3 Autor przedstawił bogaty przegląd literatury dotyczącej metod obrazowania stosowanych w diagnostyce medycznej. Omówione zostały prace przedstawiające metody diagnostyczne oparte na prześwietlaniu promieniami rentgenowskimi (RTG), prześwietlanie płaskie i tomografię komputerową, oraz metody obrazowania wykorzystujące rezonans magnetyczny oraz scyntyografię. **Autor, przedstawiając te metody, skupił się na możliwościach wykorzystania ich w endoprotezoplastyce do oceny stanu połączenia kości z implantem.** Metody te oprócz różnych zalet posiadają istotne ograniczenia w rozpatrywanym zastosowaniu, głównie związane z trudnościami w ocenie stanu połączenia kości z implantem oraz szkodliwym oddziaływaniem na organizm badanego pacjenta.

Dlatego poszukiwane są alternatywne metody diagnostyczne. **Autor w swojej rozprawie zajmuje się metodami drganiowymi, należącymi podobnie jak metody ultradźwiękowe do metod wibroakustycznych.** Metody drganiowe polegają na pomiarach wybranych parametrów drgającego układu: amplitud przemieszczeń, prędkości lub przyspieszeń w dziedzinie czasu, a następnie sporządzaniu na ich podstawie charakterystyk widmowych. **Autor stawia tezę, że na podstawie charakterystyk widmowych można wnioskować o stanie połączenia kości z implantem.**

Autor dokonuje przeglądu prac zajmujących się zastosowaniem metod drganiowych w diagnostyce medycznej np. do wykrywania osteoporozy. Omawia również prace poświęcone

wykorzystaniu metod drganiowych w endoprotezoplastyce. Mogą one być wykorzystywane w diagnostyce połączenia kości i implantu podczas wszczepiania endoprotezy, w trakcie normalnego użytkowania endoprotezy oraz w trakcie operacji rewizyjnych. Autor w swojej pracy rozwija ten nurt badań. **Jako metodę badawczą autor wybrał analizę numeryczną w powiązaniu z badaniami doświadczalnymi.**

W rozdziale 4 Autor przedstawia podstawowe wiadomości z anatomii układu kostnego, szczególną uwagę poświęcając budowie stawu biodrowego, będącego głównym obiektem badań. Omawia budowę, strukturę oraz właściwości kości udowej. Kolejne podrozdziały poświęcone są chorobom zwyrodnieniowym oraz endoprotezoplastyce stawu biodrowego.

W rozdziale 5 Autor podaje sformułowanie zagadnienia równowagi dynamicznej w mechanice kontinuum oraz wyprowadza równania MES. Przedstawia stosowane w pracy algorytmy rozwiązywania zagadnienia własnego oraz analizy modalnej.

Rozdziały 6-10 zawierają oryginalne wyniki autora. W rozdziale 6 rozważane są modele numeryczne układów zastępczych połączenia kość-implant zbudowane z elementów tulejowo-prętowych. Wymiary oraz właściwości materiałów zostały tak dobrane, aby układ zastępczy możliwie najwierniej odpowiadał układowi anatomicznemu kości z protezą. Rozpatrywano dwa rodzaje układów, jeden odpowiadający osadzeniu protezy za pomocą cementu, a drugi reprezentujący osadzenie bezcementowe. W obydwu typach układów zastępczych rozpatrywano stany odpowiadające stopniowemu obłuzowaniu protezy. Osłabienie osadzenia uzyskano poprzez redukcję powierzchni zamocowania pręta reprezentującego protezę. Badanie wpływu zmiany stanu połączenia kości i implantu na własności dynamiczne układu to główny cel obliczeń numerycznych realizowanych przez Autora dla układów zastępczych.

W analizie numerycznej posługiwano się komercyjnym programem Abaqus. Modelowanie numeryczne zostało zweryfikowane poprzez analizę prostego przykładu drgań belki wspornikowej. Dla tego przykładu wyniki numeryczne porównano z rozwiązaniem analitycznym. Przykład ten posłużył do zbadania zbieżności rozwiązania przy zagęszczaniu siatki elementów skończonych. Zbadano również wpływ typu elementów oraz schematu całkowania na jakość rozwiązania. W ten sposób dobrano optymalne parametry modeli numerycznych dla układów zastępczych.

Dla rozpatrywanych układów zastępczych stworzono modele MES oraz wykonano szereg analiz numerycznych. Dla każdego przypadku wyznaczano częstotliwości i postacie drgań własnych metodą Lanczosa, a następnie wyniki te wykorzystywano w analizie modalnej drgań wymuszonych siłą harmoniczną przy utwierdzonym jednym końcu tulei reprezentującej kość. Analizowano różne częstotliwości wymuszenia. Na podstawie przebiegów czasowych amplitudy przyspieszeń za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT) wyznaczano charakterystyki widmowe. W rozdziale 6 zamieszczono wyniki numeryczne dla wybranych reprezentatywnych przypadków układów zastępczych. Pozostałe wyniki zostały zamieszczone w dodatku A. W rozdziale 6 przedstawiono również analizę wpływu wybranych parametrów (moduł Younga, współczynnik Poissona oraz gęstość) na własności dynamiczne układów zastępczych.

W rozdziale 7 opisano badania eksperymentalne układów zastępczych identycznych z układami modelowanymi uprzednio numerycznie. W badaniach eksperymentalnych skoncentrowano się na wyznaczeniu częstotliwości drgań własnych. Warunki badań eksperymentalnych odpowiadały warunkom badań numerycznych. Badano różne stopnie obłuzowania. Do układu wprowadzano wymuszenie impulsowe (przy swobodnych warunkach brzegowych) realizowane za pomocą młotka modalnego oraz wymuszenie za pomocą siły harmonicznej (przy warunkach brzegowych odpowiadających belce

