

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

wspornikowej). W badaniach rejestrowano przyspieszenia w wybranych miejscach mierzone za pomocą przetworników drgań. Na podstawie przebiegów czasowych przyspieszeń za pomocą szybkiej transformaty Fouriera otrzymywano widma amplitudowe przyspieszenia. Widma te pozwoliły wyznaczyć częstotliwości rezonansowe układu. Wyniki badań eksperymentalnych dla wybranych przypadków zamieszczono w rozdziale 7, pozostałe wyniki zamieszczono w dodatku B.

Oprócz układów zastępczych, w pracy badano układ anatomiczny kość-implant. Badania dla tego układu ograniczono do symulacji numerycznych. Wyniki tych badań przedstawiono w rozdziale 8. W modelach numerycznych odwzorowano możliwie dokładnie geometrię kości udowej oraz osadzonej w niej za pomocą cementu protezy stawu biodrowego. Założono linowo-sprężyste, izotropowe modele materiałów. Uwzględniono tylko kość korową, zaniebując wpływ kości gąbczastej. Właściwości mechaniczne kości przyjęto na podstawie literatury, zaś właściwości cementu kostnego oraz materiału implantu (stopu tytanu z niklem) ustalono na podstawie literatury i własnych badań. Rozpatrywano dwa przypadki warunków brzegowych – warunki swobodne oraz obustronne podparcie przegubowe, co jest zbliżone do warunków podparcia kości w organizmie. Podobnie jak w przypadku układów zastępczych rozważano różne poziomy uszkodzenia połączenia kości z trzpieniem protezy. Zastosowano również podobny schemat postępowania w badaniach numerycznych, najpierw wyznaczano częstotliwości i postaci drgań własnych, a następnie badano odpowiedź dynamiczną układu na wymuszenie harmoniczne i wyznaczano charakterystykę widmową układu. Przeprowadzono również analizę wpływu wybranych parametrów (moduł Younga, współczynnik Poissona oraz gęstość) na własności dynamiczne badanego układu anatomicznego. Przykładowe wyniki symulacji numerycznej zamieszczono w rozdziale 8, zaś pozostałe można znaleźć w dodatku C.

Rozdział 9 pracy zawiera obszerną dyskusję wyników badań. Porównano badania numeryczne i eksperymentalne dla układów zastępczych. Przedyskutowano wyniki numeryczne dla układu anatomicznego. Analizując wpływ utraty spójności połączenia kości z protezą na charakterystykę widmową badanych układów, zauważono tendencję obniżania się częstotliwości własnych wraz ze wzrostem uszkodzenia, przy czym prawidłowość ta jest bardziej widoczna dla wyższych częstotliwości, pierwsza częstotliwość w niektórych przypadkach niewiele zmienia się wraz z uszkodzeniem. Tendencję tę można zauważyć zarówno w badaniach numerycznych jak i eksperymentalnych dla układu zastępczego. Występuje ona również w wynikach numerycznych dla układu anatomicznego. Porównanie wyników numerycznych i eksperymentalnych wykazuje pewną rozbieżność między nimi, (od 4% do 21% różnicy w wartości częstotliwości własnych). Autor podaje możliwe przyczyny występujących rozbieżności. Wyniki analizy wrażliwości wykazują, że spośród badanych parametrów największy wpływ mają moduł Younga i gęstość, zaś zmiany współczynnika Poissona w niewielkim stopniu wpływają na wartości częstotliwości własnych.

Rozdział 10 jest podsumowaniem całej rozprawy w formie usystematyzowanych wniosków.

2. Ocena pracy

Autor w swojej pracy podjął ważną i aktualną tematykę badawczą. Rozpatrywany problem jest bardzo istotny. Starzenie się społeczeństwa polskiego, choroby reumatoidalne i zwyrodnieniowe stawów, rak kości jak i różnorakie urazy powodują, że wzrasta liczba przeprowadzanych operacji ortopedycznych wymagających zastosowania implantów. Stabilność i długotrwałość protezy jest podstawowym warunkiem powodzenia operacji alloplastyki stawów. Obluzowanie protezy jest jedną z głównych przyczyn powodujących

konieczność operacji rewizyjnej. Diagnostyka stanu połączenia kości i protezy, zwłaszcza w początkowym okresie obluzowania jest trudna ze względu na różne ograniczenia konwencjonalnych metod obrazowania stosowanych w diagnostyce medycznej. Można wiązać duże nadzieje na zwiększenie możliwości diagnostycznych z metodami drganiowymi rozpatrywanymi przez Autora rozprawy.

Wybrana przez Autora metoda badawcza jest poprawna. Badania obejmują zarówno studia numeryczne, jak i eksperymentalne. Obiektami badań numerycznych i eksperymentalnych są układy zastępcze o odpowiednio dobranej geometrii i właściwościach materiałowych. Trudność przeprowadzenia badań „in vivo”, jak również badań „in vitro” na rzeczywistych kościach z implantami, w których można by dobrze kontrolować stan połączenia kości z protezą, uzasadnia decyzję Autora podjęcia badań na układach zastępczych, które oddają istotne cechy układów rzeczywistych.

Przyjęto właściwy schemat postępowania w badaniach numerycznych, rozpatrując zagadnienie własne oraz wyznaczając odpowiedź drgającego układu za pomocą analizy modalnej.

Poprawność wyników nie budzi wątpliwości. Model numeryczny został zweryfikowany poprzez porównanie wyników numerycznych z wynikami analitycznymi.

Na szczególne podkreślenie zasługuje połączenie analizy numerycznej z badaniami eksperymentalnymi. Dokonane porównanie wykazuje zadowalającą zgodność między wynikami numerycznymi i doświadczalnymi otrzymanymi dla układu zastępczego kości z implantem.

Przedstawione wyniki badań własności dynamicznych układu kość–implant za pomocą analizy numerycznej połączonej z badaniami eksperymentalnymi są oryginalnym osiągnięciem rozprawy.

Głównym wynikiem pracy jest potwierdzenie tezy o zmianie widma drgań układu kości z protezą na skutek osłabienia połączenia kości z trzpieniem protezy. Wyniki uzyskane przez Autora rozprawy potwierdzają możliwości oceny stanu połączenia za pomocą metod drganiowych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Słabą stroną rozprawy jest poziom przedstawienia podstaw teoretycznych stosowanych metod numerycznych. Sformułowanie zagadnienia początkowo-brzegowego w mechanice kontinuum jest niesystematyczne i niepełne. Autor, wprowadzając równanie równowagi dynamicznej (str. 31), nie mówi nic o uzupełniających go warunkach brzegowych i początkowych. Wspomina o nich dopiero po przeprowadzeniu dyskretyzacji MES (str. 36), choć już wcześniej w sposób niejawni z nich korzysta, np. stosując „przemieszczenia wirtualne” (pojęcie „przemieszczeń wirtualnych” zawiera wymaganie ich zgodności z kinematycznymi warunkami brzegowymi).

Wyprowadzenie równań MES jest przedstawione na bardzo podstawowym poziomie i zawiera pewne nieścisłości, por. uwagi 1, 3 i 8 w załączniku.

Układ pracy jest logiczny, choć pewne trudności w lekturze pracy powoduje rozdzielanie przedstawienia i dyskusji wyników, np. szersza dyskusja wyników numerycznych przedstawionych w rozdziale 6 jest zawarta w rozdziale 9.

Brak jest ogólniejszej interpretacji wyników, np. przyczyny zmian częstotliwości rezonansowych przy obluźwaniu protezy. Może warto by analizować zmiany częstotliwości rezonansowych w powiązaniu z analizą postaci drgań własnych.

W analizie numerycznej zaniedbano tłumienie. Dla badanych układów jest to uzasadnione, niemniej jednak w badaniu połączenia „in vivo” wpływ tłumienia może być znaczący.

Analizę wrażliwości przeprowadzono badając wpływ zmian modułu Younga, gęstości i współczynnika Poissona. Gęstość i moduł Younga są dla kości skorelowane można było to uwzględnić w badaniu wrażliwości i badać wrażliwość tylko względem jednej z tych wielkości.

Wprawdzie w ostatnim paragrafie we wnioskach Autor pisze o możliwości stworzenia inteligentnej protezy przekazującej informacje o stanie połączenia kości i implantu drogą bezprzewodową, w pracy nie mówi się zbyt dużo o realizacji pokazanych możliwości w praktyce klinicznej.

Wydaje się, że w końcowym etapie przygotowania tekstu rozprawy zabrakło korekty, w związku z czym tekst zawiera sporo błędów, zarówno prostych literówek, jak i błędów językowych, np. częste używanie terminu „ilość” zamiast „liczba”, np. „ilość węzłów”, „ilość punktów Gaussa” (str. 46), „ilość elementów skończonych” (str. 46), „ilość stopni swobody” (str. 37).

Spis drobniejszych usterek zauważonych w tekście rozprawy został zamieszczony w postaci załącznika na końcu recenzji. W spisie tym zawarto również zauważone nieścisłości terminologiczne.

4. Podsumowanie

Przedstawione uwagi nie dotyczą istotnych wad. Należy je traktować raczej jako uwagi porządkowe lub dyskusyjne.

Mając na względzie oryginalne wyniki, uzyskane w pracy i wymienione powyżej, uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Załącznik – spis niektórych usterek zauważonych w pracy

1. Str. 31: Autor pisze „W odróżnieniu od opisu kontynualnego, w konwencji MES reprezentacje tensorów naprężenia i odkształcenia przedstawia się nie jako macierze kwadratowe o wymiarach 3×3 , ale jako macierze kolumnowe 6×1 ”. Nie jest to ścisłe, w MES również mamy do czynienia z opisem kontinuum. Równania MES można wyprowadzić również stosując zapis tensorowy. Autor na str. 33 pisze: „W konwencji mechaniki kontinuum wirtualną pracę wewnętrzną można zapisać jako: ...” i podaje wzór zapisany w notacji, którą wcześniej odróżniał od konwencji opisu kontynualnego

2. Str. 33: Indeksy składowych sił są oznaczone przez duże litery X, Y, Z , podczas gdy wcześniej składowe tensora naprężenia i odkształcenia były oznaczane małymi literami x, y i z .
3. Str. 32: „Polega ona (zasada prac wirtualnych) na wyzwoleniu ciał z więzów i nadaniu ciału możliwości wykonywania dowolnych przemieszczeń wirtualnych.” Uwaga: Przemieszczenia wirtualne (przygotowane) są zgodne z ograniczeniami (więzami) kinematycznymi.
4. Str. 33: „sieć elementów skończonych...”. Uwaga: w języku polskim przyjęło się używać terminu „siatka elementów skończonych”
5. Str. 34, równanie (5.13): Nie jest jasne co mają oznaczać nadkreślenia nad symbolami tensora naprężenia i odkształcenia, mając na względzie, że w równaniu (5.11) nie stosuje się tego „ozdobnika”. Podobne pytanie można zadać odnośnie oznaczenia pola przemieszczenia.
6. Str.34, równanie (5.13) nie jest jasne co oznaczają symbole S_1, \dots, S_q
7. Str. 34: Autor stosuje „zasadę przemieszczeń węzłowych”. Recenzentowi nie jest znana taka zasada.
8. Str. 36: Autor pisze, że wektor R_B uwzględnia składniki bezwładnościowe i oporu lepkiego. Składniki te zostały wcześniej wyodrębnione z sił masowych, a więc nie mogą być uwzględnione w tym wektorze.
9. Str. 72: „używając operacji wyciągnięcia geometrii dokonano utworzenia przestrzennego” ???
10. Str. 73: Nie jest jasna geometria wewnętrzna kości, jak gruba jest warstwa kości korowej w modelu. Na podstawie rys. 8.3 można sądzić, że w geometrii kości nie uwzględniono jamy szpikowej.
11. Str. 74. Wymuszenie harmoniczne nie jest w pełni zdefiniowane – podana jest tylko amplituda.