

Tomasz Łodygowski
Instytut Konstrukcji Budowlanych
Politechniki Poznańskiej
ul. Piotrowo 5, 60-965 Poznań

Poznań, 18 czerwca 2009

Opinia na temat rozprawy doktorskiej pana **mgr inż. Bartosza NOWAKA**,
pt.: ***Modelowanie dynamiki układu kość-implant. Badania numeryczne
i eksperymentalne.***

1. Uwagi ogólne i treść pracy

Recenzowana rozprawa liczy 159 stron. Składa się z dziesięciu rozdziałów oraz zawiera trzy Dodatki i zestawienie bibliografii (łącznie 126 pozycji). Autor podejmuje problem modelowania układu kość-wszczep stawu biodrowego w szczególności w aspekcie dynamiki. Swe rozważania modelowe weryfikuje badaniami numerycznymi i uproszczonym eksperymentem. Modelowanie dynamiki tego układu biomechanicznego ma w konsekwencji służyć monitorowaniu jakości połączenia kości z implantem w stanach pooperacyjnych oraz w dalszej perspektywie czasowej użytkowania. Podejmowany temat jest próbą znalezienia alternatywnych sposobów tego diagnozowania, bez zagrożeń powodowanych przez klasyczne prześwietlenia promieniami Roentgena.

We Wstępie Autor sformułował cel pracy, którym jest opracowanie skutecznej techniki monitorowania stanu połączenia układu kość-implant polegającej na metodzie drganiowej. Celem jest również ocena realizowalności proponowanej metody, konieczność ustalenia warunków diagnostycznych jak również możliwość wykorzystania w przyszłości nowych technik monitorowania polegających na instalowaniu bezprzewodowych układów sensorycznych.

W Rozdziale 2 Autor w skrócie przedstawił cel i zakres rozprawy. Ważnym jest podkreślenie, że obiektami badań będą układy zastępcze i dla nich prowadzone będzie porównanie wyników obliczeń numerycznych z badaniami eksperymentalnymi. W rozdziale tym Autor przedstawił układ rozprawy.

Dalej, w kolejnym rozdziale Autor skoncentrował swoją uwagę na badaniach literaturowych, głównie dotyczących diagnostyki układu kostnego, komplikacji wynikających z alloplastyki stawu biodrowego. Zawarł też informacje o stosowanych technikach ultradźwiękowych do badań parametrów kości długich.

W kolejnym rozdziale czwartym, Autor omówił budowę, patologie i wybrane zagadnienia endoprotezoplastyki stawu biodrowego. Zawarł w nim wiele usystematyzowanych informacji anatomicznych przydatnych w przyszłości do budowy modelu numerycznego (ustalenia warunków brzegowych czy obciążeń).

W Rozdziale 5 Autor przeszedł do zagadnień mechanicznych. Podjął zagadnienie modelu i metody symulacji dynamiki układu kość-implant. Przytoczył znane podstawy modelowania zagadnień liniowych w opisie metody elementów skończonych w wersji przemieszczeniowej. Opisał teoretyczne podstawy analizy modalnej oraz procedurę Lanczosa rozwiązywania zagadnienia własnego.

W Rozdziale 6 uwaga jest skoncentrowana na badaniu numerycznym układów zastępczych. Przyjęto w nim, że połączenie kość-implant reprezentowane jest przez układ zbudowany z elementów tulejowo-prętowych. Kość udowa zastępowana jest prętem z otworem, trzpień implantu zastąpiony jest prętem o zbliżonej do implantu średnicy, zaś cement warstwy mocującej zastąpiono tuleją. Główne wymiary odpowiadają w przybliżeniu rzeczywistej geometrii opisywanego układu biomechanicznego. W badaniach numerycznych przeprowadzanych w środowisku obliczeniowym programu ABAQUS, rozważono dwie konfiguracje materiałów tworzących układ. Wykorzystano aluminium, które reprezentowało materiał kostny, poliacetal zastępował właściwości cementu kostnego a mosiądz reprezentował materiał implantu. W drugim przypadku poliacetal zastępował dwie warstwy materiału kości i cementu a mosiądz, jak w pierwszym przypadku, reprezentował implant. Taki wybór układu zastępczego podyktowany był również chęcią zweryfikowania wyników badań numerycznych w eksperymencie laboratoryjnym przeprowadzonym z użyciem tych właśnie materiałów. W celu ustalenia parametrów dyskretyzacji (typu elementów, gęstości siatki, ustalenia liczby punktów całkowania itp.) prowadzących do osiągnięcia właściwej dokładności wyników, symulacje MES porównano ze znanymi rozwiązaniami analitycznymi. Autor przedstawił schemat algorytmu obliczeń, który oblicza częstości i wektory własne, odpowiedź dynamiczną modelu na pobudzenie harmoniczne, oraz na podstawie FFT charakterystykę widmową. Przedstawiono wyniki analiz dokładności szacowania częstości drgań oraz przykładowe wyniki częstości drgań dla różnych wartości parametru degradacji cementu kostnego (ubytek procentowy połączenia kości z implantem). Wykonano również studium parametryczne wpływu wybranych parametrów na dynamikę zastępczych połączeń implantu z kością.

Przedmiotem kolejnego, siódmego rozdziału są badania eksperymentalne układów zastępczych przy zastosowaniu dwóch typów wymuszeń: impulsowego i harmonicznego. Opisano przedmioty badań, budowę stanowisk badawczych, sprzęt i sposób wykonywania pomiarów oraz przykładowe wyniki badań.

Rozdział 8 dotyczy badań układów anatomicznych. Zastosowano prawdziwą geometrię kości udowej. Zestawiono przykładowe wyniki obliczeń i badań parametrycznych. Parametry części kostnych przyjęto na podstawie literatury i zastosowano model konstytutywny liniowy izotropowy.

W Rozdziale 9 przeprowadzono dyskusję wyników badań i porównanie eksperymentów z symulacjami komputerowymi. Wykazano dobrą zgodność ilościową, która stanowi podstawę nadziei na możliwość zastosowania drgań do diagnozy jakości połączeń implantów z kośćmi.

Rozdział 10 jest swego rodzaju podsumowaniem osiągniętych wyników i prezentacją wniosków. Obok drobnych wniosków wynikających z przeprowadzanych studiów parametrycznych, najważniejsze są te, które uzasadniają przydatność zastosowania metod wibroakustycznych do diagnozowania stanu połączenia implantu. Opierają się one na obserwacji zmian w widmie drgań układów. W przypadku narastania uszkodzeń połączenia występują obniżenia częstości własnych i rezonansowych.

Pracę uzupełniają trzy dodatki, w których omówiono szczegółowo wyniki badań numerycznych układów zastępczych z dyskusją kolejnych częstości drgań własnych dla różnych parametrów degradacji połączeń kości i implantu; przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, widm amplitudowych dla pobudzenia impulsowego przy

różnych warunkach brzegowych oraz przedstawiono wyniki numeryczne układu autonomicznego, które niestety nie mogą być zweryfikowane eksperymentalnie.

Pracę kończy zestawienie bibliograficzne.

2. Ocena rozprawy i uwagi krytyczne

Podjęty przez Doktoranta temat diagnostyki jakości połączenia kość-implant po operacji alloplastyki stawu biodrowego jest ważny z punktu widzenia potencjalnych zastosowań medycznych. Wobec stosowanych dotąd metod, które można nazwać inwazyjnymi, podjęcie trudu opracowania nowej metody polegającej na analizie odpowiedzi dynamicznej na obciążenie impulsowe czy harmoniczne można uznać za celowe.

Pojawiają się jednak wątpliwości dotyczące trudności z realizacją przedsięwzięcia na żywym organizmie. W jaki sposób zrealizować obciążenie dynamiczne na pacjencie? Jak zapewnić stabilne warunki podparcia i w końcu jaki może być wpływ dynamicznego wymuszenia na proces osteointegracji, fundamentalnie ważny dla trwałości i skuteczności zabiegu operacyjnego. Wiadomo wszakże, że do połączenia kości z tytanowym implantem niezbędne są mikroodkształcenia (w bardzo specyficznym zakresie), które uruchamiają procesy fizyko-chemiczne odpowiedzialne za ewolucję kości (w tym przypadku gąbczastej). Ta dyskusja dotycząca sposobu wprowadzania zaburzenia dynamicznego i pomiaru odpowiedzi analizowanego układu, zdecydowanie o charakterze interdyscyplinarnym, powinna być podstawą wprowadzenia innowacyjnego rozwiązania. Spodziewam się podjęcia dyskusji na ten temat.

Dalsze badania Autora ograniczyły się do oceny zachowania się modelowych układów zastępczych, które tylko w bardzo zgrubny sposób przybliżają rzeczywisty układ kość-implant. Przyjęcie jednak proponowanych układów zastępczych dało Autorowi szansę na pełną analizę zachowań dynamicznych oraz na opracowanie strategii obliczeniowych i przeprowadzenie eksperymentów potwierdzających prawdziwość założeń modelowych dla dynamicznie obciążanych systemów. W badaniu odpowiedzi dynamicznych układów rzeczywistych, Autor musiał się ograniczyć do symulacji komputerowych, czego nie dało się zweryfikować doświadczalnie.

Przy opracowywaniu opiniowanej rozprawy Autor wprowadził kilka elementów oryginalnych oraz musiał pokonać wiele trudności natury numerycznej i eksperymentalnej. Do oryginalnych wyników Doktoranta zaliczam:

- Opracowanie strategii obliczeniowej (Algorytm obliczeń) z wykorzystaniem środowiska programu ABAQUS, analizy modalnej i szybkiej transformacji Fouriera FFT do ustalenia charakterystyki widmowej,
- Zaprojektowanie układów zastępczych i przeprowadzenie eksperymentów laboratoryjnych niosących, dla dwóch różnych sposobów realizacji warunków początkowych i brzegowych, wiedzę o odpowiedzi układów dla założonych warunków degradacji warstwy łączącej „implant z kością”,

- Rzetelną analizę błędów i zbieżności rozwiązań numerycznych do znanych rozwiązań analitycznych,
- Weryfikację otrzymanych wyników obliczeń poprzez eksperyment laboratoryjny,
- Przeprowadzenie obliczeń dla rzeczywistych geometrii kości i implantów niosących obraz jakościowy możliwych zachowań analizowanych układów.

W analizie numerycznej modeli najbardziej zbliżonych do rzeczywistych, Autor przyjmuje parametry materiałów izotropowych, choć przy sformułowaniu MES, na str.32 używa sformułowania anizotropowego (nie powinien Autor pisać, że „W ogólnym przypadku anizotropii, pozostaje ona nadal macierzą symetryczną o 21 niezależnych modułach sprężystości, ...” – gdyż tych niezależnych stałych jest tylko 6). W przypadku kości długich raczej powinno się przyjmować model ortotropowy.

Praca doktorska jest wydana na bardzo dobrym poziomie edytorskim co świadczy o staranności Autora.

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie podważają mojej bardzo pozytywnej oceny osiągnięć naukowych Autora i wartości samej rozprawy, która w swym ogólnym obrazie konsekwentnie zbliża do założonego sobie celu – opracowania mało inwazyjnej metody oceny stanu połączenia kość-implant.

3. Ogólna ocena rozprawy i wnioski końcowe

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Bartosza Nowaka jest przyczynkiem do nowej diagnostyki, która po dopracowaniu ważnych elementów, być może ma szansę na przyszłe zastosowania medyczne.

W trakcie opracowywania i formułowania niniejszej rozprawy Autor wykazał dobre przygotowanie do pracy naukowej, umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych, teoretycznych, numerycznych i eksperymentalnych oraz posługiwania się literaturą naukową. Uzyskane poprzez to opracowanie doświadczenie i warsztat naukowy pozwalają na kontynuację badań naukowych oraz dają nadzieję na dalszy rozwój naukowy Doktoranta.

Wobec powyższego uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.



Tomasz Łodygowski