

Prof. dr hab. inż. Tadeusz BURCZYŃSKI, czł. koresp. PAN

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. A. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

e-mail: tburczynski@ippt.pan.pl

Warszawa, 25.10.2016

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. **Agnieszki Mackiewicz**

pt. **„Mechaniczne aspekty wyężenia kolumnowej struktury kręgosłupa
z uwzględnieniem nieciągłości spowodowanych implantacją”**

1. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Mackiewicz poświęcona jest istotnym elementom oceny mechanicznej analizy obciążeń i funkcji stabilizatorów stosowanych w leczeniu dysfunkcji kręgosłupa.

Praca powstała na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Zielonogórskiego, a jej promotorem jest prof. dr hab. inż. Romuald Będziński., czł. koresp. PAN.

Recenzowana rozprawa mieści się w dyscyplinie naukowej - **budowa i eksploatacja maszyn**, w szczególności można ją zaliczyć do istotnego nurtu rozwoju współczesnej inżynierii biomedycznej.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów, podsumowania, streszczeń oraz spisu literatury (239 pozycji literaturowych).

Szczególnie trudnym obiektem badań biomechanicznych jest leczenie dysfunkcji narządu osiowego człowieka, jakim jest kręgosłup. Kręgosłup spełnia wiele różnych, istotnych dla życia człowieka funkcji, w tym: narządu osiowego, narządu podporowego ciała człowieka oraz najważniejszą - narządu ochrony rdzenia człowieka. Bardzo złożona budowa oraz pełnione funkcje powodują, że z punktu widzenia biomechaniki, jest to jeden z najtrudniejszych narządów do analizy, zarówno z punktu widzenia mechaniki jak i fizjologii. Mamy tu bowiem do czynienia z wieloma, najczęściej wzajemnie sprzężonymi zjawiskami, m.in. z nieliniową mechaniką ciała odkształcalnego, układem sterowania, w tym ze sprzężeniami zwrotnymi, biologią komórki itp. Zagadnienie jest jeszcze bardziej złożone,

jeśli analizie poddamy kręgosłup z uwzględnieniem stosowania systemów stabilizacji, przywracających niektóre funkcje, a zwłaszcza funkcje życiowe człowieka.

Przedmiotem badań Doktorantki jest wielosegmentowa kolumna, na przykładzie kręgosłupa szyjnego, poddana złożonym stanom obciążeń. W badaniach wykorzystano do tego celu analizę numeryczną opartą na metodzie elementów skończonych. Badaniom podlegał odcinek kręgosłupa szyjnego, poprawny fizjologicznie oraz ze zdegenerowanymi elementami krążka międzykręgowego oraz z zastosowaniem ramowej konstrukcji nośnej, spełniającej funkcje stabilizatora (implantu).

Doktorantka przedstawiła:

- wielostronną analizę występujących dysfunkcji i obciążeń działających w kolumnie na przykładzie kręgosłupa,
- złożony model numeryczny struktury kolumnowej kręgosłupa w warunkach fizjologicznych, z uwzględnieniem zdegenerowania podatnego krążka międzykręgowego jak i z uwzględnieniem elementów implantacyjnych wprowadzanych do układu,
- elementy modelowania poszczególnych elementów, które są strukturami anizotropowymi, o różnych charakterystykach materiałowych.

Ocenie poddano wpływ danego usztywnienia na zakres ruchomości oraz zmianę sztywności w miejscu wszczepu oraz rejonach sąsiednich z miejscem zespolenia, co jest istotnym zagadnieniem w procesie leczenia, a także projektowania nowych konstrukcji implantów. Rozprawa doktorska poświęcona jest istotnym elementom oceny mechanicznej analizy obciążeń i funkcji stabilizatorów stosowanych w leczeniu dysfunkcji kręgosłupa. Doktorantka skoncentrowała się na badaniach funkcji biomechanicznych stabilizacji kręgosłupa szyjnego implantowanego z dostępu przedniego. Podstawowym celem rozprawy były badania modelu komputerowego kręgosłupa współpracującego z implantem oraz ocena odkształceń i naprężeń w elementach strukturalnych z uwzględnieniem zmian sztywności układu kolumna nośna – układy ramowe stabilizacji.

Model ten uwzględnia zmiany właściwości mechanicznych elementów tkankowych kręgosłupa i może być przydatny w projektowaniu oraz optymalizacji wewnętrznych stabilizatorów stosowanych w leczeniu skomplikowanych dysfunkcji kręgosłupa człowieka. Opiniowana praca skoncentrowana jest na badaniach podstawowych i aplikacyjnych systemu stabilizacji kręgosłupa człowieka. Doktorantka twórczo rozwinęła walory użytkowe systemów stabilizacji, stosowanych w leczeniu dysfunkcji kręgosłupa szyjnego. Skupiła swoją uwagę na kilku aspektach naukowych dotyczących osteosyntezy kręgosłupa, a mianowicie na wyznaczeniu i doborze optymalnych charakterystyk biomechanicznych.

Opracowany model numeryczny kolumny kręgosłupa szyjnego jest wielomateriałowy o zróżnicowanych charakterystykach, w tym z zastosowaniem metalowych płytek stabilizacyjnych. W badaniach dokonano oceny stabilności układu kolumny, a przede wszystkim oceny ciągłości zmian odkształceń i naprężeń w tych wielowarstwowych strukturach. Badana kolumna składa się naprzemiennie ze sztywnych elementów kostnych, kręgów oraz podatnych krążków międzykręgowych. Kolumna kręgosłupa jest stabilna do momentu wystąpienia przeciążenia w postaci deformacji trzonów oraz układów międzytrzonowych (dysków) lub wybożenia. W tych strukturach z uwagi na procesy fizjologiczne występują zmiany destrukcyjne, które zaburzają stabilność działania, w związku z tym wprowadzane są konstrukcje implantowe takie jak płytki czy też czopy kręgowe. stabilizatory kręgosłupa.

Istotnym elementem rozprawy są:

- oryginalne modele kręgosłupa z uwzględnieniem współdziałania ze stabilizatorem oraz uwzględnieniu nieliniowych charakterystyk elementów podatnych jak krążek międzykręgowy, więzadła z wykorzystaniem metody elementów skończonych,
- model odkształceń systemu stabilizacji anatomicznej o nieliniowych charakterystykach elementów nośnych kręgosłupa (Doktorantka twórczo opracowała modele strukturalne odkształceń więzadeł, a przede wszystkim dysku - krążka, międzykręgowego).

3. Ocena merytoryczna

Problematyka identyfikacji współdziałania implantów z tkankami człowieka, a w szczególności ich wzajemnej interakcji, jest jednym z trudniejszych wyzwań dla współczesnej bioinżynierii.

W rozprawie doktorskiej zawarto:

- wielostronną analizę występujących dysfunkcji i obciążeń działających w kolumnie na przykładzie kręgosłupa,
- złożony model numeryczny struktury kolumnowej kręgosłupa w warunkach fizjologicznych, z uwzględnieniem zdegenerowania podatnego krążka międzykręgowego jak i z uwzględnieniem elementów implantacyjnych wprowadzanych do układu,
- modelowanie poszczególnych elementów, które są strukturami anizotropowymi, o różnych charakterystykach materiałowych.

- ocenę wpływu danego usztywnienia na zakres ruchomości oraz zmianę sztywności w miejscu wszczepu oraz rejonach sąsiednich z miejscem zespolenia, co jest istotnym zagadnieniem w procesie leczenia, a także projektowania nowych konstrukcji implantów.

Opracowany model numeryczny kolumny kręgosłupa szyjnego jest wielomateriałowy o zróżnicowanych charakterystykach, w tym z zastosowaniem metalowych płytek stabilizacyjnych. W badaniach dokonano oceny stabilności układu kolumny, a przede wszystkim oceny ciągłości zmian odkształceń i naprężeń w tych wielowarstwowych strukturach. Badana kolumna składa się naprzemiennie ze sztywnych elementów kostnych, kręgów oraz podatnych krążków międzykręgowych. Kolumna kręgosłupa jest stabilna do momentu wystąpienia przeciążenia w postaci deformacji trzonów oraz układów międzytrzonowych (dysków) lub wyboczenia. W tych strukturach z uwagi na procesy fizjologiczne występują zmiany destrukcyjne, które zaburzają stabilność działania, w związku z tym wprowadzane są konstrukcje implantowe, takie jak płytki czy też czopy kręgowe. W prowadzonych badaniach uwzględniono elementy zastępcze wykonane z różnych biomateriałów (stopy tytanu, stal austenityczna, polimer PEEK). Implanty te różnią się konstrukcyjnie i zmieniają charakter przestrzennych deformacji kolumny w zależności od typu obciążenia. Doktorantka podjęła badania nad najbardziej typowym sposobem obciążenia analizowanej konstrukcji, w ściskaniu oraz zginaniu, do badań zastosowała metodę elementów skończonych. Jednocześnie otrzymane rezultaty analiz odniesiono do wyników badań klinicznych.

Badania takie z istoty rzeczy w pierwszym etapie muszą być realizowane na modelach, zwłaszcza komputerowych. Oczywiście końcowym etapem takich prac badawczych będzie weryfikacja w rzeczywistym środowisku tkankowym.

Celem aplikacyjnym badań naukowych Doktorantki była ocena możliwości zastosowania aparatu współczesnej mechaniki i technologii do oceny przebiegu i skutków wystąpienia dysfunkcji w narządach ruchu człowieka, w szczególności kręgosłupa szyjnego, jak i sposobów ich skutecznego leczenia. Stąd też wybór tematu przez Doktorantkę uważam za trafny i ważny z naukowego punktu widzenia rozwoju podstaw biomechaniki stabilizacji kręgosłupa oraz aplikacji wyników badań w warunkach klinicznych.

Jednym z większych osiągnięć Doktorantki jest opracowany numeryczny model kręgosłupa z zastosowaniem różnych stabilizatorów płytkowych, w tym uwzględnieniem nieliniowości strukturalnych tkanek. Istotnym, z punktu widzenia poznawczego, była analiza zespołów przy użyciu różnych rodzajów systemów stabilizacji i ich wpływu na dysfunkcje segmentów sąsiednich do miejsca zespolenia.

Tym samym Doktorantka nawiązała do jednego z ważnych nurtów badań modelowych układu ruchu człowieka. Istotnym elementem rozprawy jest wykazanie, że miejscowe przeszywnienie odcinka kręgosłupa może powodować niekorzystne zmiany odkształceń w rejonie sąsiadujących rejonów wprowadzonego usztywnienia.

Tym samym w segmencie stabilizowanym, jak i sąsiadujących, następuje negatywna przebudowa tkanki kostnej, w szczególności w okolicy wprowadzonego wszczepu jak i sąsiednich. Powoduje to powstanie nieciągłości odkształceń, a tym samym postępującą dysfunkcję sąsiednich segmentów ruchowych kręgosłupa, prowadzącymi do komplikacji klinicznych.

Badania przedstawione w rozprawie zostały zrealizowane na dobrym poziomie naukowym. Praca, mimo że umiejscowiona jest w dyscyplinie budowa eksploatacja maszyn, ma w dużej mierze charakter interdyscyplinarny i nawiązuje do różnych obszarów wiedzy związanych głównie z medycyną i biologią, a zwłaszcza neurochirurgią, ortopedią i budową struktur człowieka. Autorka podjęła się trudnego zadania i dzięki zaangażowaniu wielu ludzi i zespołów o różnych specjalnościach, udało się stworzyć oryginalną metodykę badań oraz otrzymać interesujące wyniki, dotyczące optymalnych warunków leczenia złożonych dysfunkcji kręgosłupa człowieka.

Kluczowym zagadnieniem jest taki dobór parametrów sztywności stabilizatora, aby uzyskać unieruchomienie odłamów kości, a jednocześnie przy zapewnieniu mikroruchów osiowych elementów kręgosłupa, uzyskać dobre warunki odtworzenia ciągłości odkształceń. Do badań oraz procesu identyfikacji parametrów technicznych układu kręgosłup – stabilizator zastosowano nowoczesne narzędzia badawcze.

Uwagi dyskusyjne

- (i) Zbyt ogólnie przedstawiono modele numeryczne krążków międzykręgowych, brakuje oceny oddziaływania więzadeł oraz brakuje opisu sposobu modelowania elementów strukturalnych dysku, a także oceny relacji pierścienia z płytką graniczną. W opisie badań i budowie modelu Doktorantka dokonała wielu uproszczeń. Na przykład relacje jądro miażdżyste - pierścień nie zostały doprecyzowane, w tym brakuje oceny relacji odkształceniowych.
- (ii) Sadzę, że Doktorantka przed sformułowaniem problemu badawczego pracy powinna przedstawić analizę aktualnej literatury (w szczególności z ostatnich lat) i na tej podstawie sformułować tezę oraz istotne cele pracy.
- (iii) Doktorantka w rozprawie pisze, że wskazane byłoby uwzględnienie wpływu płynu

mózgowordzeniowego, zastosowanie nieliniowych, anizotropowych właściwości materiałowych i wprowadzenie zmiennego przekroju rdzenia, uzależnionego od poziomu rdzenia kręgowego. Brakuje natomiast nawet bardzo wstępnego oszacowania skutków tak przyjętych uproszczeń.

- (iv) Doktorantka buduje swój model na podstawie danych uzyskanych z CT preparatów sekcyjnych. Nie podaje jednak w żadnym miejscu swojej pracy jakie były wymiary poszczególnych komponentów stworzonego modelu, jak na przykład wysokość kręgów, wysokość i średnice krążków międzykręgowych itp.
- (v) Brak jest danych jaką procentową część krążka międzykręgowego stanowi jądro miażdżyste, a ma to istotne znaczenie w przenoszeniu obciążeń, zwłaszcza obciążeń zmiennych.
- (vi) Autorka w podsumowaniu sugeruje, że wskazane byłoby dokonanie optymalizacji stosowanych rozwiązań systemów stabilizacji. Czy nie warto po takich badaniach sprecyzować kryteriów i to w odniesieniu do aspektów klinicznych oraz biomechanicznych.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując przedstawione wyżej uwagi, należy stwierdzić, że przedstawiona do ceny rozprawa zawiera cenne aspekty poznawcze i użyteczne.

Do niewątpliwych osiągnięć Doktorantki należy zaliczyć:

- opracowanie oryginalnej metodyki badań złożonych układów biomechanicznych, do jakich należy konstrukcja: stabilizator – kręgosłup człowieka, z przyjęciem oryginalnego programu badań,
- opracowanie modelu komputerowego zmian właściwości mechanicznych układu: kręgosłup człowieka – implant, w omawianym przypadku stabilizator szyjny, a także modelowanie oddziaływania dysku i więzadeł na zmiany sztywności tego złożonego układu,
- włączenie do rozwiązywania trudnych interdyscyplinarnych badań różnych narzędzi badawczych oraz specjalistów z różnych dyscyplin wiedzy, tj. mechaniki (a zwłaszcza biomechaniki), inżynierii materiałowej i medycyny (w szczególności ortopedii); świadczy to o dużej umiejętności formułowania problemów naukowych,
- sformułowanie wniosków wynikających ze zrealizowanych badań, przydatnych w praktyce klinicznej, tj. ocena wpływu stosowanego rozwiązania konstrukcyjnego układu: kręgosłup – stabilizator na optymalizację procesu leczenia kręgosłupa

dysfunkcyjnego.

W zakończeniu tej części oceny można stwierdzić, że doktorantka rozwiązując problem doboru optymalnej struktury układu: kręgosłup człowieka – stabilizator (złożony układ mechaniczny), a także oddziaływania rdzenia kręgowego wniosła oryginalne elementy naukowe do dyscypliny budowa i eksploatacja maszyn, a w szczególności inżynieria biomedyczna.

Po zapoznaniu się z treścią recenzowanej rozprawy mogę stwierdzić, że stanowi ona istotny przyczynek do badań naukowych wieloelementowych systemów kolumnowych, między innymi stosowanymi w leczeniu dysfunkcji kręgosłupa, w tym przy zastosowaniu stabilizatorów kręgosłupa szyjnego.

Przedstawione w recenzji uwagi mają znaczenie porządkujące lub też stanowią element wymiany poglądów z Autorką rozprawy.

Uważam, że przedstawiona do oceny praca mgr inż. Agnieszki Mackiewicz pt. **„Mechaniczne aspekty wyężenia kolumnowej struktury kręgosłupa z uwzględnieniem nieciągłości spowodowanych implantacją”**, spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego.



Tadeusz Burczyński