



Prof. dr hab. inż. Tomasz Kubiak
Politechnika Łódzka
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji
90-924 Łódź, Stefanowskiego 1/15

Łódź, 2 września 2016

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ :
mgr inż. Agnieszki Mackiewicz
„Mechaniczne aspekty wyęźnienia kolumnowej struktury kręgosłupa z uwzględnieniem
nieciągłości spowodowanych implantacją”

1. Podstawa opracowania oceny

Niniejszą ocenę rozprawy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Romualda Będzińskiego opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Zielonogórskiego dr hab. inż. Sławomira Kłosa, prof. UZ z dnia 20 czerwca 2016 r.

2. Treść pracy

Praca doktorska mgr inż. Agnieszki Mackiewicz podejmuje niezwykle istotny temat z punktu widzenia medycyny i mechaniki kręgosłupa. Autorka podjęła się rozwiązania interdyscyplinarnego zagadnienia, do którego niezbędne jest wykorzystanie wiedzy z mechaniki, anatomii kręgosłupa i numerycznego modelowania zagadnień mechaniki z aplikacją w medycynie. Doktorantka podjęła się analizy pracy górnego odcinka szyjnego kręgosłupa przed i po implantacji. Rozpatrzyła wpływ różnego rodzaju implantów i miejsca implantacji na pracę kręgosłupa.

Jak wskazano w pracy, na podstawie danych WHO, problemy związane z dysfunkcją kręgosłupa pojawiają się u ponad 90% populacji osób po 40 roku życia. Rozwiązanie problemów jedynie na podstawie wiedzy i doświadczeń medycyny jest oczywiście możliwe, ale bardzo czasochłonne (liczone w latach) i wymagające obserwacji pacjentów. Rozwój biomechaniki, w której stosuje się metody symulacji numerycznej w połączeniu z coraz szybciej rozwijającymi się systemami i metodami komputerowymi, pozwala na dokładniejsze modelowanie zjawisk zachodzących w przyrodzie. Powyższe potwierdza słuszność doboru tematu oraz jego użyteczny charakter.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska napisana jest na 140 stronach, składa się z dziewięciu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz bibliografii zawierającej 239 pozycji literatury.

Pierwszy rozdział przybliża postawiony do rozwiązania problem i wagę podjętej tematyki.

Rozdziały od drugiego do czwartego to bardzo obszerny przegląd literatury. Rozdział drugi poświęcony jest anatomii układu kolumny kręgosłupa tj. jego odcinka szyjnego z uwzględnieniem budowy kręgów, krążków międzykręgowych oraz aparatu więzadłowego i mięśni. Rozdział trzeci przybliży czytelnikowi jakiego rodzaju dysfunkcje górnego odcinka kręgosłupa są najczęściej spotykane oraz jakie metody leczenia – implantacji – są stosowane. W rozdziale czwartym Doktorantka prezentuje znane z literatury modele numeryczne struktur kolumny kręgosłupa, uwzględniające różnorodną budowę i charakter pracy poszczególnych elementów układu oraz stosowane uproszczenia.

W rozdziale piątym pt. „Sformułowanie problemu badawczego” Doktorantka w skrócie przybliży problem jaki zamierza rozwiązać i formułuje tezę pracy, która mówi, że wyznaczenie pól naprężeń i odkształceń w szyjnym odcinku kręgosłupa „zdrowego” i po implantacji pozwoli na biomechaniczną ocenę systemów stabilizacji, co z kolei pozwoli na określenie przyszłych zmian w rejonie zespolenia oraz trudności w procesie leczenia.

Rozdział szósty przybliży czytelnikowi przyjętą metodykę badań, przedstawia jaki realizowano program badań oraz jakie zasoby materiałowe i oprogramowanie zostało wykorzystane w realizacji postawionych celów badawczych.

Rozdział siódmy poświęcony jest opisowi założeń modelu numerycznego. Doktorantka bardzo dokładnie opisuje w jaki sposób przygotowana została geometria rozpatrywanego odcinka kręgosłupa oraz stosowanych implantów. W rozdziale tym również opisane zostały przyjęte modele dyskretne wraz z przyjętymi modelami materiałowymi, zastosowanymi typami elementów, przyjętymi warunkami brzegowymi oraz sposobem obciążenia. Autorka wskazuje w jaki sposób modelowała dysfunkcje kręgosłupa oraz kręgosłup z implantami. Wszelkie aspekty przedstawione w rozdziale siódmym są bardzo dobrze poparte doniesieniami literaturowymi.

Wyniki analiz numerycznych w postaci wykresów i barwnych map naprężeń zaprezentowane zostały w rozdziale ósmym. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych dotyczą oceny ruchomości segmentów kolumny kręgosłupa szyjnego C4-Th1 zdrowego, oraz po implantacji różnych jego odcinków, przy zastosowaniu różnych typów implantów. Ocenie poddano również rozkład naprężeń w strukturach kręgosłupa po jego stabilizacji.

Rozdział dziewiąty jest zwięzłym podsumowaniem pracy, w którym Autorka przybliży jeszcze raz najważniejsze aspekty swojej pracy, podsumowuje otrzymane wyniki badań, na których podstawie formułuje wnioski końcowe.

3. Ocena pracy

Pani mgr inż. Agnieszka Mackiewicz podjęła się rozwiązania niezwykle skomplikowanego zagadnienia między innymi ze względu na:

- skomplikowany kształt geometryczny badanego obiektu,
- różnorodny rozkład materiału wraz z jego właściwościami w przekrojach elementów kręgosłupa;
- różnorodne modele materiałowe, izo- i ortotropowe, nieliniowe i liniowe, hipersprężyste;
- niejednoznaczne doniesienia literaturowe co do parametrów określających właściwości materiałowe poszczególnych elementów kręgosłupa, również w zależności od stopnia zdegenerowania;
- stosowanie różnych metod implantacji i różnych typów implantów;
- trudne do zamodelowania oddziaływanie pomiędzy elementami kręgosłupa oraz pomiędzy kręgami i implantami;
- różnorodność modeli ze względu na różne sposoby i miejsca wykonania implantacji.

Wszystkie ww. aspekty utrudniają, a wręcz uniemożliwiają jednoznaczny i dokładny opis zachowania się badanego odcinka kręgosłupa. Pomimo powyższego, Doktorantka podjęła się tego trudnego zadania i zaproponowała modele numeryczne pozwalające ocenić w sposób jakościowy wpływ implantacji na pracę odcinka szyjnego kręgosłupa. Oceny tej dokonano na podstawie porównania stanów naprężeń oraz zakresu ruchomości rozpatrywanego odcinka kręgosłupa w analizowanych przypadkach.

Zakres pracy jest bardzo obszerny, dotyczy w głównej mierze porównania stanów naprężeń i zakresów ruchomości otrzymanym na podstawie analizy modelu kręgosłupa „zdrowego”, modeli kręgosłupa z różnym stopniem degeneracji (dwa stopnie: degeneracja umiarkowana i silna), po zastosowaniu różnych krążków międzykręgowych (dwa przypadki krążek C5C6 oraz krążki C5C6 i C6C7) oraz analizy ośmiu modeli kręgosłupa po implantacji (różne miejsca implantacji i różne implanty). Oceny dokonano przy obciążaniu kręgosłupa w płaszczyźnie strzałkowej odwzorowując zgięcie do przodu i przezprost.

Uzyskane i przedstawione w rozprawie doktorskiej wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają postawioną tezę.

Podjęta przez Doktorantkę tematyka wymaga wiedzy i umiejętności z zakresu anatomii, analizy wyników CT i RMI, mechaniki i modelowania numerycznego. Na szczególną uwagę zasługuje szczegółowy przegląd literatury (ponad 200 pozycji), odniesienia do bieżącej światowej literatury w opisie przyjętych modeli numerycznych oraz walidacja przyjętych modeli z wynikami badań klinicznych uzyskanych z literatury oraz dzięki współpracy z Oddziałem Neurochirurgii Szpitala św. Rafała w Krakowie.

Efektom końcowym pracy doktorskiej są gotowe do zastosowania modele numeryczne i wskazane przez Doktorantkę możliwości ich dalszego rozwoju. Należy zwrócić uwagę, że zaproponowane modele w obecnej formie pozwoliły ocenić przydatność różnych metod implantacji.

Biorąc powyższe stwierdzam, że podjęcie tej tematyki było celowe i bardzo ważne dla zastosowań praktycznych oraz dalszego rozwoju metod biomechanicznej oceny kręgosłupa.

Praca jest napisana starannie. Zawiera ona nieliczne błędy edytorskie, które omówione zostaną w punkcie 3.2 niniejszej recenzji.

Biorąc pod uwagę wartość naukową pracy oraz możliwość natychmiastowego wykorzystania jej wyników oceniam ją bardzo dobrze.

3.1. Uwagi ogólne

Lektura rozprawy powoduje pojawienie się niejasności oraz fragmentów wymagających dodatkowych wyjaśnień Doktorantki. Większość z nich to uwagi dyskusyjne, które sformułowano następująco:

- Model numeryczny kręgów zbudowano z elementów bryłowych reprezentujących kość gąbczastą i powłokowych odwzorowujących kość korową, w pracy napisano „Model kości korowej zamodelowano elementami powłokowymi, które zostały rozpięte na zewnętrznej powierzchni elementów kości gąbczastej ...”. Ze względu na stopień skomplikowania budowy kości rozwiązanie to wydaje się dość innowacyjne, jednakże rodzi wiele pytań o świadomość zastosowania takiego rozwiązania. Czy były prowadzone jakieś przykładowe obliczenia porównawcze dla prostych geometrycznie modeli tylko bryłowych i zaproponowanych bryłowo-powłokowych ? Czy Autorka zdaje sobie sprawę z faktu, że oba typy elementów mają różne liczby stopni swobody w węzłach, a co za tym idzie różne funkcje kształtu? Czy na pewno wszystkie węzły elementów powłokowych łączą się ze wszystkimi węzłami elementów bryłowych leżących na powierzchni zewnętrznej? Czy świadomie zastosowano model powłokowy wiedząc, że w standardowym ustawieniu element modeluje powierzchnie środkową powłoki (grubość powłoki – tu kości korowej

narasta symetrycznie od elementu na zewnątrz i do wewnątrz), czyli model zakłada przenikanie kości gąbczastej przez połowę grubości kości korowej?

- Nieprecyzyjnie opisano przyjęty model numeryczny krążków międzykręgowych, być może brak jest odpowiednich rysunków. W tekście znajduje się informacja, że obszar jądra miażdżystego jak i obszar pierścienia (a może pierścieni – lewa strona rys. 7.4) włóknistego zamodelowano elementami bryłowymi. W odczuciu recenzenta, jakieś fragmenty zamodelowane są za pomocą elementów typu powłokowego, na co wskazuje zarówno wspomniana lewa strona rysunku 7.4 jak i opis poniżej rysunku mówiący, że zastosowano elementy membranowe na matrycę pierścienia włóknistego. Czy celowo użyto nazwę membranowe zamiast powłokowe? jaki typ elementu zastosowano? czy rzeczywiście założono, że efekt zgięciowy nie występuje? jak połączono elementy bryłowe z elementami powłokowymi ?
- Zarówno z przedstawionej do recenzji rozprawy jak i z literatury przedmiotu wynika, że dolna część kręgosłupa w badaniach doświadczalnych jest utwierdzana, co w ocenie recenzenta nie odpowiada rzeczywistości, jaki wpływ na wyniki badań ma takie założenie?, czy mimo nierzeczywistych warunków brzegowych można wyniki odnosić do rzeczywistego (choćby jakościowego) stanu naprężeń w kręgosłupie? Czy warunki brzegowe w postaci utwierdzenia nie zakłócają otrzymanych wyników, w szczególności tych dla pierwszego kręgu powyżej utwierdzenia?
- W kilku miejscach pracy pojawiają się niezręczne sformułowania, będące prawdopodobnie skrótami myślowymi. Są to:
 - Str. 14 „... pierścień włóknisty, który przekształca je w naprężenia rozciągające ...”
 - Str. 15 „... tłumią naprężenia przekazywane ...”; „... przy średnim i dużym zakresie naprężeń.”
 - Str. 24 „utrata stateczności” czy rzeczywiście jest tu mowa o zjawisku wyboczenia?
- W pracy zastosowano bardzo podobne oznaczenia v_m i v_m dla tempa wyzwalania energii (brak jednostki) i prędkości skurczu włókien mięśniowych (str. 5). Porównując równania 5 i 7 na str. 21 nie wiadomo czym się różni tempo od prędkości.
- Na rys. 3.11 (str. 42) pojawiają się naprężenia, przy czym nie sprecyzowano o jakie naprężenia chodzi, nie wiadomo również czy przedstawione wartości są na akceptowalnym poziomie, czy może zbyt duże?
- Str. 58 linie 9 i 10 sformułowanie „... stosuje się quasi-statyczny model obciążenie, który umożliwi aplikację metod numerycznych ...” wydaje się nie zrozumiałe, gdyż postęp w rozwoju metod numerycznych i różnego rodzaju aplikacji pozwala analizować zagadnienia zarówno statyczne jak i dynamiczne. Czy Autorka przypadkiem nie miała na myśli złożoności problemu uwzględniającego nieliniowości materiałowe i geometryczne oraz trudności w pozyskaniu wszystkich dynamicznych charakterystyk materiałowych.
- W rozdziale 7.1 zbyt szczegółowo w ocenie recenzenta opisany został sposób obróbki wyników z tomografu w celu uzyskania bryły na potrzeby MES – tak szczegółowych opisów, o charakterze przepisu, raczej nie stosuje się w pracach naukowych.
- W opisie wyników pojawia się wielokrotnie odniesienie do naprężeń w płytkach granicznych, a w modelu numerycznym nie wskazano gdzie one występują i jak je zamodelowano. Pojawia się również pytanie czy w tym wypadku można wyznaczać naprężenia zredukowane stosując hipotezę Hubera.
- Brak informacji jak wyznaczono naprężenia średnie wg. Hipotezy Hubera (patrz str. 103 linia 26).
- Na rysunkach 8.16 i 8.17 pojawiają się nieczytelne mapy naprężeń. Dlaczego maksymalne wartości naprężeń na skali to 1, a w legendzie są wielokrotnie większe ? W jakich

jednostkach podano te naprężenia ? Z legendy wynika, że mapy prezentują naprężenia zredukowane wg. Hipotezy Hubera, dlaczego zastosowano tę hipotezę dla konstrukcji z materiału ortotropowego?

- W pracy brak jest informacji jak zdefiniowany/mierzony jest zakres ruchu.
- W podsumowaniu pojawiają się: „... oraz rozkład odkształceń ...” i „... umożliwiły ocenę wytrzymałości struktur ...” pomimo, że w pracy nie przedstawiono wyników odkształceń, jak również nie znaleziono wyników pokazujących porównania naprężeń występujących w strukturze do naprężeń niszczących.

3.2. Uwagi szczegółowe

W pracy pojawiły się również drobne błędy, prawdopodobnie powstałe w procesie edycji. Są to:

- Błędy w literaturze i cytowaniach. Zastosowano system harwardzki z pewnymi błędami. W spisie literatury pozycje 29, 71, 72, 149 i 236 zakłócają porządek alfabetyczny. W tekście rozprawy brak powołania na następujące pozycje literatury 86, 117, 132, 175 i 227. W spisie literatury pojawiają się pozycje tych samych pierwszych autorów wydane w tym samym roku, które w zastosowanej metodzie cytowania nie są rozróżnialne (nie wiadomo, do której z pozycji jest odwołanie w tekście), są to: 88 i 89; 115 i 116; 162 i 163; 229 i 231. W pozycji 124 literatury nie podano roku wydania. W tekście rozprawy wskazano odwołania do nie istniejących pozycji w spisie literatury, są to: Keaveny 1994 str.12, Będziński 1995 str. 31, Yoganandan 1995 str. 52, Yoganandan 1998 str. 57, Wen 1993 str. 57, Sobotta 2012 str. 74, Masmoudi 2006 str. 85, Ishihara 2004 str. 87, Reitman 2004 str. 87, Maiman 1999 str. 103. W cytowaniach stron internetowych brak daty odwiedzania strony oraz tytułu tekstu i jego autora jeżeli podany. W kilku cytowaniach w tekście, na końcu pojawia się „inni” co nie jest precyzyjnym wskazaniem do cytowanej pozycji literatury.
- Str. 6 linia 9 jest „wytępenia” winno być „wystąpienia”.
- Rys. 2.10, w podpisie pojawia się słowo „przeciwnym”, a winno być: „prostopadłym do kierunku włókien”.
- Str. 32 rys. 3.4. strzałki w schemacie nie są we właściwych kierunkach.
- Str. 39 jest „... lepszy wzrost kostny w porównaniu z wzrost kostny zaobserwowano dla powierzchni ...” chyba powinno być: „... lepszy wzrost kostny w porównaniu ze wzrostem kostnym zaobserwowanym dla powierzchni ...”.
- Str. 51 linia 2 „Z uwagi jego złożoną ...” chyba „Z uwagi na jego złożoną ...”.
- Str. 56 Tabela 4.3. Jakie wartości znajdują się w tabeli i w jakich jednostkach ?
- Str. 63 rysunek 6.1. nieczytelne linie w niektórych polach schematu blokowego.
- Str. 70 linia 16 pojawia się odwołanie do nieistniejącego rysunku – rysunek 29C.
- Pierwszy akapit rozdz. 8 (str. 87) powtarza się z pierwszym akapitem podrozdziału 8.2 (str. 95).
- Str. 80 w podpisie pod rys. 7.8 brak objaśnienia dla rysunku D.
- Wypunktowanie na str. 88 i 89 stanowi powtórzenie Tabeli 7.1
- Str. 100 linia 19 Autorka pisze: „Zwiększenie ROM (3,4o) mieściło się w zakresie od 88,2% do 97,1%.”, z tekstu nie wynika % czego i jak został wyznaczony ?
- Str. 109 ostatnia linia „... a jakie mogą skutki mogą wystąpić ...” niepotrzebne pierwsze słowo „mogą”.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Lektura rozprawy pozwala stwierdzić, że mgr inż. Agnieszka Mackiewicz posiada wiedzę z zakresu anatomii kręgosłupa oraz wiedzę i umiejętności korzystania z numerycznych metod mechaniki, a w szczególności z metody elementów skończonych.

Autorka zrealizowała zaplanowane zadania badawcze i wykazała słuszność postawionej w pracy tezy naukowej. **Mgr inż. Agnieszka Mackiewicz sformułowała i rozwiązała ważny problem naukowy, wykazując się umiejętnością prowadzenia badań naukowych.**

Na szczególną uwagę zasługuje umiejętne wykorzystanie numerycznych metod mechaniki do przygotowania skomplikowanych modeli numerycznych pozwalających analizować pracę szyjnego odcinka kręgosłupa.

Należy nadmienić, że Autorka posiada współautorską publikację w czasopiśmie z listy JCR, dotyczącą tematu rozprawy doktorskiej.

Do oryginalnych osiągnięć Doktorantki zaliczyć należy opracowanie:

- numerycznych modeli szyjnego odcinka kręgosłupa „zdrowego”, z dysfunkcjami oraz po implantacji, uwzględniających kształt poszczególnych elementów jak i ich właściwości materiałowe;
- metody oceny przydatności implantów w zależności od rodzaju dysfunkcji na podstawie oceny ruchomości i stanu naprężeń.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych i potknięć edytorskich uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Mackiewicz p.t.: „*Mechaniczne aspekty wyężenia kolumnowej struktury kręgosłupa z uwzględnieniem nieciągłości spowodowanych implantacją*” spełnia warunki stawiane przez:

- Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003r z późniejszymi zmianami;
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku i na tej podstawie **wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**

Tomasz Kubicki