

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Piotra Wądołowskiego**
pt. „Modele MES zespołów kość-stabilizator i ich zastosowanie w projektowaniu połączeń
płytkowych żuchwy”

***Podstawa opracowania: Pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria
Mechaniczna Politechniki Warszawskiej Prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika,
nr RNDIM/521/30/2022 z dnia 13.06.2022 r.***

1. Zasadność podjęcia tematu rozprawy doktorskiej i jej zakres

Badania *in silico* stały się aktualnie standardem w zakresie interdyscyplinarnego podejścia łączącego nauki medyczne i inżynierskie umożliwiającym wariantowe analizy złożonych procedur diagnostycznych, zabiegowych i chirurgicznych, w tym oczywiście rozważanym w pracy zagadnieniom traumatologii w chirurgii twarzowo-szczękowej. Postęp w zakresie coraz bardziej złożonych symulacji numerycznych dotyczących procedur chirurgicznych jest ciągłym stymulatorem w poszukiwaniu nowych rozwiązań zabiegowych, wykorzystujących nowoczesne materiały, oryginalne rozwiązania konstrukcyjne, czy coraz bardziej złożone systemy sterowania.

Mgr inż. Piotr Wądołowski w swojej rozprawie doktorskiej podjął się trudnego zadania opracowania modelu numerycznego MES układu stomatognatycznego żuchwy umożliwiającego symulację leczenia złamania kąta żuchwy metodą osteosyntezy płytkowej. Wyniki przeprowadzonych analiz umożliwiły ocenę wytrzymałości odłamów kostnych, elementów zespalających, zachowania się szczeliny złamania w aspekcie przebudowy tkanki kostnej, oszacowania sił mięśniowych czy reakcji stawowych. Wyniki prezentowane w pracy z pewnością mogą być przydatne dla chirurgów szczękowych w doborze warunków zacisku szczeliny złamania leczonej metodą osteosyntezy płytkowej.

Pracę rozpoczyna rozdział 1, w którym Autor formułuje cel pracy oraz jasno stawia tezę naukową pracy, co nie zawsze jest standardem w rozprawach naukowych. Kolejne rozdziały 2 - 5 to przegląd literaturowy dotyczący biomechaniki żuchwy, technik leczenia jej

urazów i złamań oraz metod modelowania metodą elementów skończonych, w szczególności w aspekcie stabilizacji i zespożeń płytkowych. Najważniejsze dla pracy to rozdziały 6 – 8, w których Doktorant przedstawia kolejne etapy związane z budową modeli numerycznych, symulacjami oraz analizą postprocesorową. Rozprawę kończą prawidłowo i adekwatnie do otrzymanych wyników analiz sformułowane wnioski.

Autor swoje opracowanie przedstawił łącznie na 223 stronach maszynopisu zawierającego tekst, tabele, rysunki, wykaz 151 cytowanych pozycji literaturowych.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Praca ma typowo numeryczny charakter. W swojej rozprawie mgr inż. Piotr Wądołowski przedstawił własne, oryginalne i nietrywialne podejście do modelowania przypadku złamania w obszarze kąta żuchwy i jej leczenia metodą osteosyntezy płytkowej. Jest to zadanie trudne gdyż w tym przypadku badacz ma do czynienia ze złożonym układem tkanek biologicznych współpracujących z implantacyjnymi materiałami metalicznymi. Prowadzi to do złożonych analiz wytrzymałościowych, często dla nieliniowych materiałowo i geometrycznie struktur układu. W analizie procesów osteointegracyjnych związanych z przebudową kości pod wpływem stymulatorów mechanicznych zagadnienie dodatkowo komplikuje redystrybucja rozkładów odkształceń/naprężeń w wyniku zmiany stałych materiałowych czy warunków brzegowych. Doktorant w swojej rozprawie skoncentrował się na zagadniu modelowania powierzchni kontaktujących oraz elementów zespalających wychodząc ze słusznego założenia, że „... z uwagi na fizykę zagadnienia szczególnie nacisk został położony na modelowanie połączeń kontaktowych, gdyż problem ten jest rzadko uwzględniany w opracowaniach, a jest kluczowy z punktu widzenia mechaniki połączeń ...”, co jako Recenzent potwierdzam.

Przedstawiony wstęp do modelowania metodą elementów skończonych, szczególnie w zakresie dyskretyzacji, zbieżności analiz, czy wspomnianych już podstaw modelowania i analizy kontaktu wykazuje, że Doktorant posiada już rozległą, ugruntowaną wiedzę oraz duże doświadczenie praktyczne z zakresu projektowania i modelowania numerycznego MES elementów konstrukcji. Według mnie prawidłowo potrafi ocenić podjęty przez siebie problem, właściwie sformułować tezę i cele badawcze, do realizacji, których stosuje nowoczesne metody symulacyjne. Do najważniejszych metodycznych osiągnięć Doktoranta moim zdaniem należy zaliczyć:

- opracowanie własnego, oryginalnego, wariantowego modelu numerycznego przypadku stabilizacji mini płytkowej złamania kąta żuchwy umożliwiającego analizę stanu wyężeń elementów układu oraz ocenę przylegania sąsiadujących odłamów kostnych i predykcję przyszłych warunków kostnozrostu,
- zamodelowanie w układzie biomechanicznym złożonych form kontaktu pomiędzy współpracującymi elementami typu: powierzchnia do powierzchni, linia do powierzchni, węzeł do powierzchni, z uwzględnieniem efektów tarcia i wcisku,
- uwzględnienie plastycznego kształtowania płytki stabilizującej, co oddaje rzeczywiste warunki kliniczne zabiegu operacyjnego, ale równocześnie skutkuje koniecznością uwzględnienia wpływu naprężeń resztkowych w analizie numerycznej,
- zamodelowanie warunków brzegowych poprzez rozmycie obciążeń skupionych eliminujące efekty lokalnych koncentracji naprężeń i możliwe osobliwości numeryczne.
- uwzględnienie własności krążka stawowego jako hipersprężystego modelu materiałowego typu Mooneya-Rivlina,
- podkreślenie w analizie niesymetrycznego obciążenia żuchwy przypadku obciążenia pierwszego zęba przedtrzonowego, który skutkuje nie tylko najwyższymi wartościami sił reakcji w stawach skroniowo-żuchwowych, ale równocześnie, jak pokazuje praktyka kliniczna, jest to ząb, który najczęściej podlega procesom próchnicznym w wyniku mikropęknięć lub wręcz finalnemu zniszczeniu,
- poprawna i dogłębna analiza walidacyjna modelu MES przeprowadzona dla kości zdrowej żuchwy ujmująca wzajemne korelacje pomiędzy wartościami sekwencyjnego obciążenia okluzyjnego przyłożonego na poszczególne grupy zębowe, a wartościami sił mięśniowych układu stomatognatycznego żuchwy oraz wartościami reakcji w stawach skroniowo-żuchwowych; analiza ta poparta jest szerokim odniesieniem literaturowym do badań eksperymentalnych w tym obszarze.

3. Uwagi krytyczne

W punkcie tym przedstawiam pewne uwagi krytyczne, często o charakterze polemicznym, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą:

- w modelu i analizie MES Autor przyjął konfigurację przyłożonych obciążeń, tzw. ‘przez zęby’; jest to zadanie odwrotne do fizjologicznego obciążenia żuchwy poprzez siły mięśniowe, które wywołują reakcje więzów na podparciu zębowym; w analizach liniowych nie ma to znaczenia, ale przy uwzględnieniu nieliniowości (kontakt, tarcie, nieliniowość materiałowa krążka stawowego) może to mieć wpływ na procesy iteracyjne i wyniki analiz postprocesorowych,
- w aspekcie powyższej uwagi (obciążenie układu poprzez bierne siły okluzyjne) mam wątpliwość czy przyjęte obciążenia na poszczególne grupy zębowe po pierwszym tygodniu od zespolenia (Tab. 6.10) nie są istotnie zawyżone; w praktyce klinicznej w pierwszych dniach po operacji pacjent przyjmuje rozdrobniony pokarm czy napoje przez rurkę, więc lokalne naciski na zęby są minimalne,
- dla struktury kości trabekularnej przyjęto model ciała izotropowego; badania i doniesienia literaturowe wskazują raczej na materiał o cechach izotropii poprzecznej (uproszczony model belki silnie zakrzywionej z wyróżnionym kierunkiem wzdłużnym),
- Autor w analizie możliwości adaptacyjnych tkanki kostnej intensywność odkształcenia określa poprzez maksymalne odkształcenie ścinania (wzór 6.13); we wcześniejszych swoich pracach w tym aspekcie stosowałem podejście ‘Huberowskie’ wynikające z hipotezy energii odkształcenia postaciowego; prosiłbym o komentarz czy oba te podejścia mogą prowadzić do istotnych różnic w wynikach,
- w nawiązaniu do powyższej uwagi prezentowane na rysunkach 8.3 oraz 8.38 – 8.45 wartości intensywności odkształceń tkanki kostnej, szczególnie w obszarach bezpośredniej stabilizacji implantacyjnej, są bardzo wysokie; nie odpowiada to danym zawartym w Tab. 6.12,
- do oceny sztywności poszczególnych wariantów połączenia implantacyjnego przyjęto porównanie rozkładów i wartości maksymalnych przemieszczeń; zgadzam się, że tzw. ‘mikroruchy’ odpowiadające za dynamizację procesu

kostnozrostu są powszechnie uznane, ale dla Recenzenta, częściowo również jako ‘wytrzymałościowca’ pojęcie sztywności jest ściśle związane z cechami geometrycznymi i materiałowymi,

- do pełnej analizy wytrzymałościowej układu zespalanej po złamaniu żuchwy brakuje mi ilustracji naprężeniowej wyteżeń struktur kostnych, szczególnie interesujących w obrębie szczeliny złamania, również ze względu na efekty kompresji odłamów kostnych; Autor taką analizę przedstawia tylko dla płytek zespalających oraz dla kości zbitej żuchwy zdrowej w reprezentacji maksymalnych naprężeń głównych,
- w opisie procesu osteointegracji (rozdz. 3.8) Autor niezbyt szczęśliwie używa określenia linii działania sił obciążających - jest to określenie zbyt kolokwialne; w literaturze przyjęte jest określenie przebudowy architektury trabekularnej kości wzdłuż kierunków naprężeń/odkształceń głównych,
- pewien mój niedosyt w dyskusji wyników badań budzi brak odniesień własnych analiz numerycznych do badań innych autorów (badania kliniczne czy modelowe), które racjonalizują liczbę i położenie mikroplytek; w rozważanym przypadku złamania w obszarze kąta żuchwy standardem jest montaż płytki wzdłuż lub poniżej kresy skośnej, a dla lepszej stabilizacji zastosowanie drugiej płytki umiejscowionej wzdłuż górnej krawędzi żuchwy, co w przybliżeniu odpowiada konfiguracji modelu 3,
- w podsumowaniu pracy Doktorant wskazuje na możliwość, czy wręcz konieczność modyfikacji modelu (uwzględnienie procesu osteointegracji i zmiany gęstości/sztywności tkanki kostnej) pod kątem dalszych analiz uwzględniających zagadnienie trwałości płytek zespalających sugerując analizę zmęczenia niskocyklowego; średnia liczba cyklicznych obciążeń żuchwy w skali roku jest szacowana nawet na kilkaset tysięcy; moim zdaniem powinna to być analiza zmęczenia wysokocyklowego (naprężeniowego),
- praca jest napisana bardzo starannie edycyjnie więc moje uwagi szczegółowe odnoszą się tylko do nielicznych zauważonych nieścisłości:
 - występujące błędy w wykazie niektórych cytowanych pozycji literaturowych (braki wydawcy, roku wydania, stron, czy daty dostępności strony internetowej),
 - mało czytelne niektóre tabele zamieszczone w pracy.

4. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa jest oryginalnym rozwiązaniem postawionego zadania badawczego oraz zawiera cenne aspekty poznawcze w obszarze modelowania układów biomechanicznych z wykorzystaniem metod elementów skończonych. W moim przekonaniu praca jest merytorycznie poprawna, a jej podstawowy cel został zrealizowany, tzn. opracowano wariantowe modele zespołów dla przypadku złamania w obszarze kąta żuchwy oraz przeprowadzono analizy stanów mechanicznych w symulacji numerycznej jej leczenia metodą osteosyntezy płytkowej.

Rozprawę doktorską mgr inż. Piotra Wądołowskiego można sklasyfikować w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Opiniowana praca odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim i, w nawiązaniu do przepisów o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) oraz w związku z § 6 ust. 3 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 19 stycznia 2018 r. (Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce - Dz. U. z 2018r., poz. 1669) i jej nowelizacją (Dz. U. poz. 1669 z 2019 r. poz. 39 i 534 oraz z 2020 r. poz. 695), wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie Autora do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

