

Zabrze, 24.08.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Wądołowskiego
pod tytułem

***Modele MES zespoień kość-stabilizator i ich zastosowanie w projektowaniu
połączeń płytkowych żuchwy***

Podstawę opracowania stanowi pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Roberta Sitnika nr RNDIM/521/30/2022 podyktowane decyzją Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 01.06.2022r. oraz dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Wądołowskiego napisana pod opieką naukową Śp. dra hab. inż. Grzegorza Krześcińskiego prof. PW. i dra hab. inż. Piotra Marek oraz promotora pomocniczego dra inż. Pawła Borkowskiego.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Problematyka leczenia złamań kości jest współcześnie rozważana i badana w szerokim zakresie naukowym i w różnych aspektach: chirurgicznym, biologicznym, fizjologicznym, histopatologicznym, a także biomechanicznym. Pełne poznanie zjawisk mechanicznych towarzyszącym procesowi osteosyntezy kości i jej zespoleniu jest ważne zarówno od strony naukowej, jak też praktycznej. Aktualności tematyki pracy należy upatrywać w złożeniu poruszanych zagadnień, podejmowanych z zastosowaniem modeli MES zespoień kość-stabilizator, w których analizowane są zjawiska dotyczące wyężenia kości i interakcji kość-płytki. Szczęólnego znaczenia nabierają modele symulujące różne typy zespolenia mostowego i współdzielonego, w których uwzględniona została wstępna kompresja i wstępne naprężenia. W ujęciu mechanicznym takie modele powinny charakteryzować się odpowiednim naśladowaniem biologicznego układu i wiernie odwzorowywać jego budowę oraz funkcjonalność. W świetle obecnego stanu wiedzy, znane są opracowania opisujące i symulujące procesy osteosyntezy kości, w tym kości żuchwy. Wśród czynników warunkujących i wpływających na właściwości zespolenia kości, oprócz biologicznych, duże znaczenie mają mechaniczne. W znanych modelach zespolenia kości żuchwy w przyjmowanych warunkach brzegowych stosowane są różne czynniki mechaniczne, lecz za główny przyjmuje się siłę zgryzu. Rzadko w modelach tych uwzględniane są mięśnie i stawy skroniowo-żuchwowe, a także pomijane są kontakty pomiędzy elementami modelu oraz wstępne naprężenia. Zastosowanie modeli symulujących fizjologiczny układ obciążenia pozwala na lepsze określenie właściwości zespolenia odpowiadającym tym stanom. W tym sensie, znajomość budowy układu stomatognatycznego, fizjologicznych warunków obciążeniowych i ich wpływu na zespolenie może przyczynić się do poprawy procesu leczenia złamań kości poprzez dobór optymalnej stabilizacji.

Pomimo aktualnie prowadzonych badań w wielu ośrodkach naukowych brakuje informacji w pełni określających i wyjaśniających wpływ czynników mechanicznych na proces osteosyntezy kości, zwłaszcza wstępnej kompresji. Takiej próby podjął się Doktorant, który w pracy zaproponował model zespolenia kości żuchwy uwzględniający wstępne naprężenia w warunkach początkowych symulacji mostowej i współdzielonej stabilizacji płytkowej. W następstwie tych badań modelowych dokonał oceny właściwości połączenia stosując kryteria odnoszące się nie tylko do płyt stabilizacyjnych, ale także do elementów układu żucia tj. sił w stawach skroniowo-żuchwowych oraz stanu odkształcenia kości. W tym kontekście dobór tematu pracy uważam za prawidłowy i aktualny, mieszczący się w ważnym i priorytetowym obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę: mechanika.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana praca została napisana na 223 stronach maszynopisu w formie zwartej publikacji/monografii, która składa się z 12 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu literatury oraz załącznika. Układ treści pracy został zaprezentowany w nietypowej kolejności i rozpoczyna się od rozdziału (1) Cel i teza pracy. Kolejne rozdziały posiadają następujące tytuły: (2) Wstęp; (3) Biomechanika żuchwy i techniki leczenia złamań; (4) Modelowanie metodą elementów skończonych stabilizacji złamania kości żuchwy; (5) Przegląd bibliograficzny badania i modelowania zespołów żuchwy; (6) Budowa modelu analitycznego; (7) Analiza wytrzymałościowa zdrowej kości żuchwy; (8) Analiza wytrzymałościowa zespolenia płytkowego kości żuchwy; (9) Wnioski, (10) Podsumowanie; (11) Bibliografia; (12) Załącznik, na który składa się 10 tabel z wynikami symulacji. Natomiast bibliografia zawiera 151 pozycji literaturowych.

Tematyka pracy doktorskiej nawiązuje do badań w warunkach *in silico* (modelowych) dotyczących zespołów kości i ich właściwości mechanicznych zależnych od zastosowanego stabilizatora i rodzaju obciążenia na przykładzie kości żuchwy. W pierwszym rozdziale Autor zdefiniował Cel i tezę pracy, które zostały sformułowane na podstawie przeglądu literaturowego przedstawionego w następnych rozdziałach. Natomiast, drugi rozdział stanowi Wstęp zawierający przesłanki i uzasadnienie podjętej tematyki. W rozdziale trzecim zostały zawarte ogólne informacje dotyczące budowy i biomechaniki żuchwy fizjologicznie prawidłowej oraz uszkodzonej, a także problematyka leczenia złamań żuchwy. W czwartym rozdziale przedstawiono teoretyczne podstawy modelowania metodą elementów skończonych układów biomechanicznych z uwzględnieniem zagadnienia kontaktu. Natomiast, rozdział piąty zawiera analizę aktualnego stanu wiedzy na gruncie przeglądu literatury, który swoim zakresem obejmował zagadnienia dotyczące badań i modelowania zespołów żuchwy.

W rozdziale szóstym został zaprezentowany proces modelowania złamanej żuchwy wraz z płytkami do osteosyntezy. Przedstawiono w nim etapy budowy modelu numerycznego począwszy od segmentacji struktur kostnych ze zdjęć TK i na tej podstawie tworzenie geometrycznych modeli kości, poprzez ich dyskretyzację, definiowanie właściwości materiałowych aż do formułowania warunków brzegowych uwzględniających kontakt. Opracowany model obejmuje nie tylko kość żuchwy, ale również oba stawy skroniowo-żuchwowe oraz istotne dla czynności żucia mięśnie układu stomatognatycznego tj. m. żwacz, m. skroniowy i m. skrzydłowy przyśrodkowy. Tak zbudowany model umożliwił odwzorowanie fizjologicznych warunków obciążenia. Ponadto, Autor przy budowie modelu zaimplementował algorytm formowania płytki, aby uwzględnić naprężenia wstępne w warunkach początkowych symulacji. Na końcu rozdziału Autor przedstawił przyjęte kryteria oceny wytrzymałości zespolenia kości żuchwy.

Uzyskane wyniki symulacji zdrowej kości żuchwy zostały przedstawione w rozdziale siódmym na podstawie, których Doktorant dokonał weryfikacji modelu. Pozytywnie zwalidowany model posłużył w dalszej części pracy do oceny wyników uzyskanych dla modeli poszczególnych zespołów złamanej kości żuchwy. Natomiast, w rozdziale ósmym przedstawiona została analiza wytrzymałościowa zespolenia kości dla pięciu rodzajów stabilizacji płytkowej przy dwóch różnych połączeniach: mostowego i współdzielonego, bez oraz ze wstępną kompresją. Dodatkowe wyniki symulacji, które uzupełniają informacje dotyczące wpływu rodzaju połączenia płytek z kością żuchwy na właściwości mechaniczne zespolenia numerycznych zostały zawarte w rozdziale dwunastym.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono wnioski, które Doktorant formułował na podstawie otrzymanych wyników symulacji złamanej żuchwy przed i po zespoleniu. Rozdział dziesiąty zawiera podsumowanie zrealizowanych badań modelowych. W rozdziale tym zostały również podkreślone oryginalne elementy rozprawy, a także przedstawiono perspektywy dalszych badań.

Przedstawioną rozprawę doktorską pod względem poziomu edytorskiego oceniam bardzo pozytywnie. Należy przy tym podkreślić dbałość Doktoranta o stronę redakcyjną pracy, której dużą zaletą stanowi oprawa ilustratorska/graficzna, co sprawia, że recenzowaną dysertację czyta się z dużą przyjemnością. Jedynym małym mankamentem pracy jest jej układ (podział na rozdziały), który osobiście zmieniłbym umieszczając cel i tezę pracy po przeglądzie literaturowym.

3. Wartość merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy można zauważyć, że w dominującej części zawiera badania modelowe (symulacyjne, *in silico*), które obecnie stanowią trzeci filar nauki obok eksperymentu (doświadczenia) i teorii. Modelowanie i symulacja komputerowa stanowią cenne źródło nowej wiedzy szczególnie dotyczącej zjawisk fizycznych czy procesów fizjologicznych zachodzących w organizmach żywych, dla których badania doświadczalne są ograniczone, a wręcz zabronione. W tym kontekście przedstawiony przez Autora dobór metod i narzędzi numerycznych do modelowania i symulacji zespolenia kości jest prawidłowy. Ponadto, zaprezentowany w rozprawie doktorskiej proces modelowania kości żuchwy wraz z mięśniami i stawami skroniowo-żuchwowymi zakończony pozytywną jego weryfikacją wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz efektywnego korzystania ze stosowanych programów numerycznych. Gwarantowało to uzyskanie wiarygodnych wyników symulacji i właściwą ich interpretację. Analizę wyników numerycznych Doktorant przeprowadził stosując przyjęte kryteria oceny, a także dokonując przy tym ich komentowania na tle literatury przedmiotu. Pozwoliło to na sformułowanie jasnych i poprawnych wniosków, które stanowiły przesłanki do walidacji/spełnienia postawionej tezy.

Głównym zagadnieniem naukowym, które Doktorant rozpatruje jest identyfikacja właściwości mechanicznych zespolenia kości w warunkach *in silico*. W tym celu został zaproponowany model kości żuchwy obejmujący również mięśnie i stawy skroniowo-żuchwowe, przez co odwzorowano fizjologiczne warunki obciążeniowe. Prezentacja aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do sposobów modelowania zespolenia kości pozwoliły Doktorantowi określić właściwości materiałowe elementów układu stomatognatycznego oraz wartości sił obciążenia, co uważam za poprawne i właściwe dla tego układu. Zespolenie kości żuchwy Doktorant zasymulował dla różnych wariantów połączenia płytkowego z uwzględnieniem wstępnej kompresji, co stanowi wyjątek w układach biomechanicznych. Realizacja zaplanowanego programu symulacji stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, których wyniki uzupełniają aktualny stan wiedzy dotyczący zespolenia kości żuchwy. Do istotnych i oryginalnych elementów rozprawy zaliczam:

- opracowanie modelu kości żuchwy wraz z mięśniami i stawami skroniowo-żuchwowymi i jego numeryczna implementacja dla różnych wariantów stabilizacji złamanej żuchwy;
- dobór kryteriów oceny właściwości zespolenia kości żuchwy,
- określenie (*in silico*) wpływu rodzaju zespolenia złamanej żuchwy na właściwości połączenia stabilizator-kość przy obciążeniu fizjologicznym.

Przedstawione w rozprawie badania modelowe umożliwiły Doktorantowi sformułowanie przekonujących spostrzeżeń i wniosków, które poparte uzyskanymi wynikami stanowią potwierdzenie przyjętej tezy. W rozprawie wykazano zależność zmian właściwości mechanicznych kości od rodzaju zastosowanego wariantu zespolenia płytkowego. Doktorant również zauważa potrzebę prowadzenia dalszych badań dla pełnego zrozumienia zjawisk zachodzących podczas osteosyntezy zwłaszcza w kontekście doboru optymalnych parametrów stabilizacji sprzyjających zrostowi kości.

4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Praca zredagowana jest poprawnie w sposób zrozumiały z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Jakość opracowania naukowego świadczy o dużej dojrzałości naukowej Autora. Dowodem jest samodzielność w generowaniu programu badawczego (logiczny i kompleksowy) i jego realizacji, aż do wyciągania konstruktywnych wniosków z proponowaniem kierunku dalszych działań. Pod dyskusję podałbym jednak założoną tezę badawczą, którą Doktorant sformułował z dwóch części. W mojej opinii pierwsza część cyt.: „*Dokładne rozpatrzenie stanu wyężenia kości i sposobu przylegania sąsiadujących odłamów w miejscu łączenia żuchwy, przeprowadzone przy pomocy symulacji numerycznej MES, umożliwi określenie wytycznych w planowaniu oraz leczeniu operacyjnym z wykorzystaniem zespołen płytkowych*” jest istotną i trafną, gdyż przeprowadzone przez Doktoranta symulacje i uzyskane wyniki są potwierdzeniem słuszności tej tezy oraz poprawności przyjętej postaci modelu zespolenia kości. Natomiast, druga część tezy mówiąca, że „*w istotny sposób przyczyniając się do poprawy stanu zdrowia i komfortu pacjentów*” nie jest oczywista i wymaga dowodzenia, gdyż wykracza poza zakres i cel pracy doktorskiej oraz dotyka nie tylko czynników biomechanicznych, ale również medycznych i biologicznych zespolenia kości żuchwy.

Praca zawiera pewne fragmenty wymagające dyskusji i wyjaśnienia ze względu na ujęte skróty myślowe lub zawarte ograniczenia, które nie uwzględniono w części opisowej poszczególnych rozdziałów. Przykładem są dopuszczalne obciążenia kości żuchwy w okresie przed i po-operacyjnym prezentowane w tabeli 3.3, które zostały dobrane na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego (Harada i inni [50]). W mojej opinii brakuje wyjaśnienia dlaczego siła zgryzu dla kobiet przed operacją jest mniejsza niż po operacji, a na podstawie tych samych badań u mężczyzn sytuacja jest odwrotna. Ponadto, wartość średnia siły zgryzu (301N) jest o wiele większa od wartości sił zarejestrowanych u kobiet (276N) i mężczyzn (251N) w 24 tygodniu po operacji. Również należałoby szczegółowo skomentować i wyjaśnić dane przedstawione w tabeli 6.10. Zawiera ona wartości sił zgryzu przyjęte do analiz MES, które są większe dla kłów po stronie złamania od sił przyjętych po stronie zdrowej. Natomiast dla pozostałych rodzajów zębów siły po stronie zdrowej są równe lub większe od sił po stronie złamania.

Szerszego wyjaśnienia wymaga określenie „*złamanie korzystne bądź niekorzystne*” stosowane w pracy (str. 24, rys. 3.18). Szczególnie niezrozumiałe jest określenie „*złamanie korzystne*”, które w swoim znaczeniu odnosi się do złamania kości, ale posiada pozytywny wydźwięk, gdy złamanie kości raczej kojarzy się negatywnie np. z bólem. Ponadto stosowanie dosłownego tłumaczenia dla „*favorable, unfavorable*” oraz potocznego słownictwa np. „*proces regeneracji przebiega z różną szybkością*” (str. 106) nie pasuje do stylu naukowego pracy.

Niezrozumiałe jest także odsunięcie odłamów kostnych CNOF w zakresie od -0,5 mm do 1,5 mm w prezentowanej formie na str. 102, gdzie minus sugeruje raczej wcisk, a nie odsunięcie. Wymagałoby to szerszego omówienia i rozróżnienia sytuacji oddalania od przenikania się odłamów kostnych. Autor w tym miejscu podaje jedynie wyjaśnienie, że zazwyczaj szczelina domyka się pod wpływem sił zgryzu i na potrzeby analizy przyjęto szerszy zakres wartości wstępnej szczeliny uwzględniając kontakt pomiędzy odłamami kostnymi.

Przeprowadzona przez Dyplomanta weryfikacja modelu żuchwy posiada charakter jakościowy, a nie ilościowy. Porównane wyniki otrzymane z symulacji zdrowej kości żuchwy z danymi literaturowymi wykazują duże różnice. W tej sytuacji nasuwa się pytanie: czy na pewno model został opracowany poprawnie? Jednak dla tak przyjętych warunków brzegowych różnice musiały wystąpić, gdyż model cechuje się innymi przekrojami mięśni oraz wartością siły zgryzu od modeli przyjętych do walidacji (tabela 7.3). Jedynie w przypadku porównania sił mięśniowych będących wynikiem obciążenia drugiego zęba trzonowego siłą 749N z danymi badań Koriatha i Hannama [74] wykazano średnią różnicę na poziomie 10–15%. Tak przeprowadzona weryfikacja daje podstawę przyjęcia modelu za

poprawny, lecz wprowadza niepewność co do wartości otrzymywanych wyników. Szkoda, że Dyplomant nie zaprezentował wyników symulacji dla tych samych warunków przyjętych w badaniach literaturowych, do których się odwoływał. W mojej opinii, dla tak przygotowanego modelu można byłoby uzyskać lepszą weryfikację. Również odwrócenie sytuacji czynności zgryzu, gdy wartość obciążenia (N) jest zadana, a siły mięśniowe są wynikiem jej działania, wydaje się słabo uzasadnione. Lepszym rozwiązaniem byłoby wprowadzenie wstępnego napięcia mięśni, które powodowałyby siłę zgryzu, co byłoby bardziej zbliżone do warunków fizjologicznych układu stomatognatycznego.

Ogólnie, przeprowadzone analizy modelu kości żuchwy i uzyskane wyniki dla różnych wariantów zespolenia wskazują na możliwość dobrania optymalnego rodzaju połączenia płytkowego przy uwzględnieniu wstępnej kompresji. Autor wskazuje układ dwóch płytek (model trzeci) za najlepszy, który posiada optymalne własności dla każdego z analizowanych kryteriów. Jednakże, na podstawie porównania efektywności analizowanych modeli zespolenia kąta żuchwy zaprezentowanego w tabeli 10.1 można wywnioskować, że najlepszymi własnościami cechuje się model piąty. Wskazuje na to kolor zielony przypisany dla dwóch kryteriów: d) naprężenia zredukowane w płytkach zespalających i e) intensywność odkształcenia elastycznego w kości zbitej. Oznacza to, że dany typ zespolenia uzyskał korzystniejszy wynik w porównaniu do pozostałych. Ponadto, oznaczenie kolorem zielonym pierwszego i drugiego modelu dla kryterium a) wpływ na zmianę siły w stawach skroniowo-żuchwowych jest błędne z przyjętą zasadą, że kolor zielony przypada tylko najlepszemu wariantowi. Małym niedosytem recenzowanej pracy jest brak porównania wyników symulacji z udostępnionym przypadkiem zespolonej kości żuchwy pacjenta I Kliniki Chirurgii Czaszkowo-Szczękowo-Twarzowej Klinicznego Szpitala Dzieciątka Jezus. Takie porównanie mogłoby potwierdzić efektywną użyteczność trzeciego modelu zespolenia kości dwoma płytkami do osteosyntezy.

Przeprowadzone symulacje numeryczne przy fizjologicznym układzie obciążenia umożliwiły wyznaczenie rozkładu odkształcenia w kości zbitej/korowej dla różnych rodzajów stabilizacji i na drodze porównania wskazują, że układ dwóch płytek stwarza lepsze warunki do prawidłowego procesu gojenia. Na tle tak obiecujących wyników Doktorant widzi potrzebę dalszych badań, głównie dotyczących zmęczenia niskocyklowego elementów zespalających. Uważam, że jest to uzasadnione, gdyż w dostępnej literaturze brakuje przykładów analiz trwałości płytek zespalających w warunkach zmiennych obciążeń.

W pracy zauważalne są też pewne błędy natury redakcyjnej (edytorskiej), do których można zaliczyć m. in.:

- liczne „wdowy” i „sieroty” tj. pozostawienie na końcu akapitu krótkiego (zazwyczaj) jednowyrazowego wiersza czy pojedynczych liter, najczęściej spójników na ostatnim miejscu w wersie;
- stosowanie anglojęzycznych opisów rysunków zamiast polskich np. rys. 3.18, rys. 4.7 rys. 4.8 rys. 4.10, rys. 4.11, rys. 7.3;
- brak jednostek przy wartościach przedstawionych w tabeli 7.4 oraz 7.5 (str. 127, str. 128);
- podpis rysunku 6.1 nie zawiera opisu do rycin a i b przedstawiających model żuchwy uzyskany na podstawie zdjęć TK z nałożoną strukturą;
- większość rysunków przedstawionych w pracy jest słabej jakości, która może wynikać z ich pomniejszenia, dlatego utrudniony jest odczyt opisów i ich interpretacja;
- większość tabeli również jest słabej jakości i ich zawartości są nieczytelne, np. tabele 8.2 ÷ 8.7, które przedstawiają zmiany sztywności zespolień;
- spis literatury zawiera strony internetowe, które powinny być oddzielnie wypunktowane/wymienione na jego końcu.

Pozostałe drobne uwagi i błędy redakcyjne zostały zaznaczone w tekście pracy i przekazane Autorowi.

5. Ocena końcowa

Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Piotr Wądołowski w sposób oryginalny analizuje istotny w leczeniu urazów/złamań układu stomatognatycznego problem zespolenia kości, co świadczy o dobrej wiedzy Doktoranta w szerokim zakresie m.in. dotyczącej metod obliczeń numerycznych, analizy MES oraz wytrzymałości materiałów. Pragnę zaakcentować zarówno dobór standaryzowanych narzędzi badawczych (programy 3DSlicer, Geomagic, Siemens NX10, Asnys i inne), jak i efektywne ich wykorzystanie przy opracowaniu wysokiej jakości modeli, co jest dowodem samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskiego modelu kości żuchwy uwzględniającego mięśnie i stawy skroniowo-żuchwowe oraz zastosowanie go do analizy zmian właściwości różnych wariantów zespolenia złamania żuchwy w symulowanym obciążeniu fizjologicznym. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do planowania sposobu terapii/leczenia złamań żuchwy i być pomocne przy opracowaniu stabilizacji płytkowej gwarantujące optymalne warunki osteosyntezy/zrostu kości.

Jednocześnie zwracając uwagę na samą sylwetkę Doktoranta w aktywności naukowej, czego przykładem są Autorskie publikacje zawarte w pracy doktorskiej pragnę podkreślić ambicje i walory młodego naukowca. Doktorant legitymizuje się dwoma publikacjami ujętymi w bazie JCR oraz indeksowanymi przez WoS/Scopus, a także kilkoma wystąpieniami konferencyjnymi.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Piotra Wądołowskiego spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2020r. poz.85) i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wojciech Wołoski