

Zabrze, 05.01.2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Zawadzkiego
pod tytułem

Sposób precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Zawadzkiego pt.: *Sposób precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych* napisana pod opieką naukową dr. hab. inż. Rafała Talara oraz promotora pomocniczego dr. hab. n. med. Mikołaja Dąbrowskiego. Formalną podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej prof. dr hab. inż. Olafa Ciszaka nr DIM.075.463.2023 i uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej nr 8/III/11/2023 z dnia 2 listopada 2023 r. oraz dołączona do niego rozprawa doktorska, które otrzymano dnia 06.11.2023 r.

Zagadnienia poruszane w pracy dotyczą aktualnej problematyki ortopedycznego leczenia narządu ruchu, a zwłaszcza zabiegów chirurgicznych dotyczących układu kostnego. Proces obróbki tkanki kostnej jest współcześnie rozważany i badany w szerokim zakresie naukowym i w różnych aspektach: chirurgiczno-ortopedycznym mając na uwadze rozwój nowych metod i narzędzi, biologicznym, fizjologicznym, a także biomechanicznym m.in. analizie emisji ciepła i zjawisk zachodzących podczas usuwania tkanki kostnej. Ze względu na rozwój endoprotezoplastyki i pojawiające się we współczesnej ortopedii innowacje dotyczące automatyzacji oraz robotyzacji zabiegów istnieje konieczność pełnego poznania i kontrolowania z dużą dokładnością procesu obróbki powierzchni kostnych. W tym aspekcie, zaplanowanie chirurgicznego zabiegu operacyjnego (ortopedycznego) wymaga odpowiedniego doboru metody z pośród konwencjonalnych i niekonwencjonalnych, a także precyzyjnego określenia parametrów obróbki kości. Dlatego uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej jest ważna i aktualna, gdyż poruszane są w niej zjawiska występujące w trakcie procesu skrawania powierzchni kostnych. Również ze względu na naukowo-aplikacyjny charakter badań oraz analizowane w niej zagadnienia dotyczące kształtowania tkanki kostnej za pomocą narzędzi skrawających stwierdzam, że mieści się ona w obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę: inżynieria mechaniczna.

2. Ocena struktury i układu rozprawy

Recenzowana praca obejmuje 168 stron maszynopisu w formie zwartej monografii zawierającej wykaz oznaczeń i akronimów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisy treści, rysunków, tablic oraz literatury, a także załącznik. Treść pracy została podzielona na pięć rozdziałów i w nich zawartych podrozdziałów. Praca rozpoczyna się od rozdziału zatytułowanego Wprowadzenie (1). Kolejne rozdziały posiadają następujące tytuły: Badania eksperymentalne (2); Modelowanie numeryczne i fizyczne obróbki tkanki kostnej (3); Opracowanie prototypu narzędzia do obróbki powierzchni kostnych (4); Wnioski końcowe (5). Bibliografia składa się z 288 pozycji literaturowych, a spisy rysunków i tabel zawierają odpowiednio 107 rysunków i 36 tabel z wynikami.

W pierwszym rozdziale, ze względu na badawczo-praktyczny charakter pracy, Autor przedstawił tezę naukową i użyteczną (aplikacyjną) oraz cele do każdej z nich. Za główny problem naukowy przyjął: *opis mechanizmu obróbki tkanki kostnej (korowej - zbitej) i zjawisk towarzyszących*, a za główny cel użyteczny: *opracowanie techniki obróbki ściernej do zastosowania w zabiegach chirurgii ortopedycznej*. Moim zdaniem tezy i cele rozprawy w pełni oddają przedmiot rozprawy i odnajdują potwierdzenie w jej

treści. Ponadto, rozdział ten zawiera przesłanki i uzasadnienie podjętej tematyki. Zostały w nim zawarte ogólne informacje dotyczące struktury tkanki kostnej i jej biomechanicznych właściwości, a także zagadnienia dotyczące metod obróbki tkanki kostnej stosowane we współczesnej chirurgii ortopedycznej.

W drugim rozdziale przedstawiono zrealizowane badania eksperymentalne i ich wyniki. Przeprowadzone badania obejmowały: badanie skrawania ortogonalnego ostrzem o zdefiniowanej geometrii, badanie mechanizmu propagacji pęknięć w tkance kostnej podczas skrawania, badanie obróbki tkanki kostnej pojedynczym ziarnem ciernym oraz narzędziem o niezdefiniowanej geometrii, a także badanie właściwości cieplnych tkanki kostnej i warunków termicznych podczas procesu obróbki. Natomiast, rozdział trzeci zawiera zagadnienia dotyczące modelowania obróbki tkanki kostnej. Badania modelowe z wykorzystaniem metody elementów skończonych obejmowały opracowanie i walidację modelu obróbki tkanki kostnej z zastosowaniem narzędzia o ujemnym kącie natarcia.

W rozdziale czwartym został zaprezentowany opracowany prototyp narzędzia do obróbki powierzchni kostnych. Doktorant zaprezentował w nim założenia projektowe oraz wytypował przypadek kliniczny, do którego urządzenie mogło mieć zastosowanie w praktyce lekarskiej. Otrzymane wyniki z przeprowadzonych badań umożliwiły Doktorantowi opracowanie dwóch wariantów prototypowego narzędzia, które również poddał testom sprawdzającym ich wydajność i skuteczność podczas obróbki powierzchni kostnych. Ostatni rozdział pracy (piąty) zawiera podsumowanie i wnioski końcowe, które Doktorant formułował na podstawie otrzymanych wyników z wszystkich przeprowadzonych badań i zrealizowanych zadań. 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. Ocena merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy można zauważyć, że w dominującej części zawiera ona badania eksperymentalne, które obok modelowania (*in silico*) i teorii stanowią podstawowy filar nauki. Eksperyment jest źródłem nowej wiedzy i dostarcza cennych informacji szczególnie dotyczących zjawisk fizycznych czy procesów fizjologicznych zachodzących w organizmach żywych, które są niezbędne do weryfikacji i walidacji modeli czy symulacji. W tym kontekście przedstawiony przez Autora dobór metod i narzędzi do realizacji badań dotyczących obróbki tkanki kostnej jest prawidłowy. Ponadto, zaprezentowany w rozprawie doktorskiej plan zadań badawczych i projektowych wskazuje na umiejętność poprawnego organizowania pracy naukowej oraz efektywnego korzystania z aparatury badawczej. Doktorant prawidłowo zaplanował harmonogram badań, co gwarantowało uzyskaniem wiarygodnych wyników i właściwą ich interpretację na tle literatury przedmiotu. Pozwoliło to na sformułowanie poprawnych wniosków, które stanowiły przesłanki do opracowania autorskiego narzędzia do obróbki powierzchni kostnych.

Głównym zagadnieniem naukowym, które Doktorant rozpatruje jest identyfikacja mechanizmu obróbki tkanki kostnej i zjawisk jej towarzyszących. W tym celu zostały przeprowadzone badania eksperymentalne procesu skrawania tkanki kostnej z zastosowaniem ostrzy o zdefiniowanej i niezdefiniowanej geometrii z uwzględnieniem fizjologicznych warunków i klinicznych wymogów. Uzupełnienie tych badań stanowią modele fizyczne i numeryczne, które umożliwiły jakościowe i ilościowe scharakteryzowanie procesu skrawania korowej tkanki kostnej z uwzględnieniem orientacji

osteonów względem ostrza. Wyniki tych badań oraz przegląd aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do sposobów obróbki stosowanych w chirurgii ortopedycznej umożliwiły Doktorantowi określenie wytycznych i założeń do zaprojektowania narzędzia do kształtowania powierzchni kostnych, co niewątpliwie stanowi wyjątkowe osiągnięcie Doktoranta. Uważam, że realizacja całościowego programu prac badawczych stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, których wyniki uzupełniają aktualny stan wiedzy dotyczący obróbki skrawania tkanki kostnej. Do istotnych i ważnych elementów rozprawy zaliczam:

- opis mechanizmu kształtowania powierzchni kostnych za pomocą narzędzi o zdefiniowanej i niezdefiniowanej geometrii ostrza oraz opracowanie fenomenologicznego modelu skrawania ortogonalnego tkanki kostnej i jego numerycznej implementacji;
- określenie wpływu różnego rodzaju parametrów obróbki i szerokiego zakresu geometrii ostrza na precyzję i przebieg procesu skrawania tkanki kostnej;
- zdefiniowanie wytycznych i założeń projektowych oraz opracowanie prototypowego narzędzia do obróbki ściernej powierzchni kostnych.

Przedstawione w rozprawie badania umożliwiły Doktorantowi zrealizowanie założonych celów naukowych oraz sformułowanie przekonujących spostrzeżeń i wniosków, które poparte uzyskanymi wynikami stanowią potwierdzenie przyjętych tez. W rozprawie wykazano możliwość praktycznego zastosowania narzędzia o niezdefiniowanej geometrii ostrzy do kształtowania powierzchni kostnych, a także zaprezentowano autorski system dedykowany do wybranego przypadku klinicznego. Doktorant również zauważa potrzebę prowadzenia dalszych badań dla pełnego zrozumienia zjawisk zachodzących podczas procesu skrawania w kontekście doboru optymalnych parametrów obróbki oraz udoskonalania prototypu narzędzia w celu zwiększenia wydajności skrawania.

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 sformułowanie dwóch tez, określanych przez Doktoranta: pierwsza jako utylitarna, a druga naukowa. W mojej opinii pierwsza teza cyt.: *„możliwe jest zastosowanie narzędzia o niezdefiniowanej geometrii ostrzy do kształtowania powierzchni kostnych za pomocą autorskiego systemu obróbki powierzchni kostnych”* jest trafną i wyczerpującą w odniesieniu do tematu rozprawy. Ponadto, przeprowadzone przez Doktoranta badania i uzyskane wyniki są potwierdzeniem słuszności tej tezy. Natomiast, druga teza (naukowa) mówiąca, że *„jest możliwość opisu mechanizmu obróbki tkanki kostnej zbitnej i zjawisk jej towarzyszących za pomocą modelu procesu obróbki uwzględniającego cechy i parametry materiałowe tkanki”*, powinna być przyjęta za jeden z celów szczegółowych, którego realizacja umożliwi i doprowadzi do opracowania narzędzia do obróbki tkanki kostnej.

Na podstawie wnikliwej analizy treści rozprawy zauważyłem, że 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 jest schemat realizacji zaplanowanych zadań projektowych prototypu narzędzia przedstawiony na rys. 1.1. W mojej opinii sposób prezentacji planu zadań projektowych jest nieodpowiedni, gdyż nie zawiera on istotnych informacji o tytułach i kolejności zadań. Doktorant powinien taki plan sporządzić w takiej samej formie jak plan badań przedstawiony na rys. 1.2. Poza tym, plan zadań projektowych powinien być przedstawiony po prezentacji harmonogramu zadań badawczych, gdyż wynika to z treści rozprawy.

Zauważalne jest zbyt duże przesycenie treści rozprawy odnośnikami do cytowanych pozycji literaturowych. Szczególnie dotyczy to rozdziału 1.2 oraz 1.3, gdzie na niespełna 13 stronach maszynopisu Autor zacytował aż 151 pozycji literaturowych (średnio 12 na jedną stronę). Biorąc pod uwagę objętość treści rozprawy (ok. 120 stron) miałem obawy, że w sumie będzie ponad tysiąc cytowanych pozycji. Ostatecznie bibliografia obejmuje 288 pozycji literaturowych, co oznacza, że w dalszej części pracy na ok. 110 stronach zacytowano tylko 137 pozycji. Jednakże, spis literatury obejmuje swoim zakresem artykuły z przed ponad 40 lat. Uważam, że w rozprawie przede wszystkim powinno się odnosić do aktualnej i nowej wiedzy (*state of the art*) dotyczącej poruszanych zagadnień, a starsze niż 10. letnie doniesienia traktować jako powszechnie znany stan wiedzy. Dobrym przykładem są właściwości kości, które Autor określił i zebrał na podstawie przeglądu literatury i zaprezentował w tabelach 1.1, 1.2 oraz 1.3. Każda z nich zawiera inną wartość współczynnika Poissona w zakresie od wartości 0,3 (tabela 1.2 – 2002r.; 2008r.) poprzez 0,4 (tabela 1.3 – 2020r.) aż do 0,6 (tabela 1.1 – 1975r.). Ponadto, w tabeli 1.4 przedstawił właściwości tkanki kostnej przyjmowane w symulacjach numerycznych, które również dla wartości współczynnika Poissona posiadają wartości od 0,17 do 0,33. To samo dotyczy tabeli 1.5.

Przy tak szerokim i szczegółowym dokonaniem przeglądu literaturowym brakuje krytycznej oceny stanu wiedzy dotyczącego poruszanych zagadnień oraz informacji, które dane były istotne i niezbędne do realizacji pracy. Szczególnie dotyczy to badań modelowych, dla których nie zostały przedstawione założenia i przyjęte parametry materiałowe, dobrane na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego. Dotyczy to zwłaszcza modelu izotropowego tkanki kostnej. Dla pozostałych modeli kości Autor podaje albo odnośnik do literatury, albo prezentuje wartości bez odniesienia do literatury. Dodatkowo spis literatury został uporządkowany według kolejności cytowania, a nie alfabetycznie względem autorów, co powoduje trudności jego weryfikacji.

Niezrozumiałe jest także prezentowanie w pracy różnych rodzajów pęknięć kości (str. 56 - 3, str. 64 - 7) stosując przy tym odmiennych określeń. Wymagałoby to szerszego omówienia i ujednoczenia, gdyż Autor stosuje wiele nazw: *pęknięcia wzdłużne, prostopadłe, poprzeczne i ścinające*, a także *pęknięcie mieszane, słabo penetrujące, wyłamanie, rozrywanie* czy też *przetarcie* oraz *deformacja materiału*. Dodatkowo wprowadza różne „tryby” (typy, rodzaje) skrawania: *pękające (FCS), ścinająco-pękające (SCS) oraz całkowitego odkształcenia (PPS)*, stosując/dokonując przy tym luźnego/swobodnego tłumaczenia np. „*pure plowing state*” – „*tryb całkowitego odkształcenia*”. Analogiczna uwaga dotyczy jednostek prezentowanych wielkości fizycznych, zwłaszcza odnoszących się do prędkości skrawaniem. Autor stosuje różne jednostki m.in. *mm/s, mm/min*. Równoczesne stosowanie różnych określeń i jednostek utrudnia zrozumienie omawianych zagadnień. Ponadto stosowanie potocznego słownictwa np. „*kość zbita*” zamiast „*kość korowa*” lub „*istota zbita kości*”, czy „*szybkość*” zamiast „*prędkość*” nie pasuje do stylu naukowego pracy.

Pewne wyniki badań zawarte w pracy wymagają szerszego komentarza i wyjaśnienia. Dotyczy to przede wszystkim prezentowanego wykresu na rys. 2.50 w rozdziale 2.4.3 *Obróbka zespołem ziaren*. Brakuje wyjaśnienia jak Autor wyznaczył prędkość zagłębiania v_z dla trzech wyróżnionych etapów pracy narzędzia. Czy jest ona średnią wartością prędkości wyznaczoną dla każdego etapu osobno, czy jest współczynnikiem kierunkowym stycznej do krzywej wyznaczonym na początku każdego etapu?. Poza tym, oś czasu prezentowanego wykresu obejmuje zakres od 0 do 1700 s (ok. 0,5 godz.), a przyjęty czas trwania testu wynosi 5000 s (ok. 1,5 godz.). Dodatkowo, w analizie wyników Autor stwierdza, że prędkość zagłębiania trzeciego etapu do zakończenia procesu się nie zmienia, więc zachodzi pytanie jaki był czas trwania testu: czy 1,5 godz. czy 0,5 godz.? Ponadto, kolejny eksperyment przeprowadzono w czasie 60 min (1 godz.), a inne trwały 30 min czy 10 min. Również inne parametry eksperymentów zawarte w tabeli 2.14, zwłaszcza prędkość skrawania przedstawiono w innych (błędnych) jednostkach. Wg moich obliczeń wartości prędkości skrawania przedstawiono *mm/s*, a nie w *mm/min*. Niektóre komentarze do tych wyników badań są nieprecyzyjne.

Zaprezentowane przez Doktoranta modelowanie numeryczne i fizyczne obróbki tkanki kostnej w mojej opinii jest w rzeczywistości modelowaniem numerycznym i teoretycznym (analizą fenomenologiczną). W tym miejscu należy przywołać definicję modelu teoretycznego (nominalnego, fenomenologicznego), który jest formułowany i wyprowadzany na podstawie znanych praw (fizyki i in.) wykorzystując zasady matematyki. Struktura modelu może być złożona i szczegółowa oraz wynika z praw natury, a parametry modelu są dane jako funkcje własności systemu i nie są znane dokładnie. W tym sensie przedstawiony model skrawania tkanki kostnej narzędziem o ujemnym kącie natarcia oraz mechanizmu formowania się wiórów (rozdz. 3.3.) jest modelem teoretycznym (fenomenologicznym). Ponadto, kolejność prezentacji modeli powinna być odwrotna: najpierw model teoretyczny a potem numeryczny, ponieważ model numeryczny jest implementacją i symulacją modelu teoretycznego. Szkoda, że Doktorant nie zawarł na początku tego rozdziału (3) w sposób syntetyczny wszystkich przyjętych założeń upraszczających, a także nie przedstawił wszystkich warunków brzegowych poprzedzających proces modelowania i symulacji numerycznych, np. brakuje informacji o prędkości skrawaniem. Ponadto, w części badań eksperymentalnych (rozdz. 2.5.4) Doktorant prezentuje częściowe wyniki symulacji, a dopiero po niej przedstawia badania modelowe. Taki układ treści pracy utrudnia ocenę wyników i budzi wiele pytań m.in. czy są one (wyniki) wiarygodne. Moim zdaniem Doktorant powinien usystematyzować treść rozprawy w kolejności zaczynając od badań doświadczalnych poprzez modelowanie teoretyczne kończąc badaniami modelowymi i ich weryfikacją.

Przeprowadzona przez Dyplomanta weryfikacja modeli posiada charakter jakościowy, a nie ilościowy. Porównane wyniki otrzymane z symulacji z danymi eksperymentu wykazują różnice, które nie zostały oszacowane ilościowo i nie określono błędów obliczeń. W tej sytuacji trudno jednoznacznie stwierdzić/określić stopień poprawności opracowania. Brak prezentacji przyjętych warunków brzegowych symulacji, a także kryteriów oceny modelu również utrudnia jego walidację. Doktorant dokonuje jedynie obrazowego porównania wyników symulacji numerycznych z badaniami eksperymentalnymi formowania się wióra dla ostrzy o trzech kątach natarcia (40° , 0° , -40° , rys. 3.2). W mojej opinii, tak przeprowadzona weryfikacja wprowadza niepewność co do wartości otrzymywanych wyników. Przykładem może być wartość temperatury w strefie kontaktu narzędzia o kącie natarcia -30° (st.) z tkanką kostną. W rozdziale 2.5.4. Doktorant prezentuje temperaturę nieprzekraczającą 90°C , którą wyznaczono przy założeniu $a_p = 50 \mu\text{m}$ i $v_c = 1000 \text{ mm/s}$, a w tabeli 3.1. dla tej samej wartości kąta natarcia podaje, że średnia temperatura wynosi 105°C dla $a_p = 100 \mu\text{m}$. Czy ta różnica wynika tylko z głębokości, czy też z prędkości skrawania. Szkoda, że Dyplomant nie zaprezentował zbiorczo wyników symulacji dla wszystkich przeprowadzonych testów, gdyż w ten sposób można byłoby lepiej uzasadnić słuszność zastosowania modelu izotropowego do oceny procesu formowania się wiórów.

Ogólnie, przeprowadzone analizy i uzyskane wyniki dla różnych wariantów modelu tkanki kostnej (izotropowy, ortotropowy oraz kompozytowy) dostarczają cennych informacji i wskazują na możliwość skrawania narzędziem o ujemnym kącie natarcia bez negatywnych skutków. Autor dokonał opisu mechanizmu skrawania rozpatrując różne typy obróbki formułując przy tym model obróbki umożliwiający analizowanie wiele czynników i parametrów. Na podstawie porównania efektywności modelu dla analizowanych kierunków skrawania względem kości w zależności od kąta natarcia zaprezentowanego na rys. 3.21 można wywnioskować, że wyniki modelowe najlepiej korelują z obserwacjami eksperymentalnymi w przypadku skrawania równoległego.

Przeprowadzone badania doświadczalne, modelowe i teoretyczne dotyczące obróbki skrawaniem tkanki kostnej dowiodły, że możliwe jest zastosowanie narzędzia o niezdefiniowanej geometrii ostrzy (o ujemnym kącie natarcia), a także umożliwiły Autorowi określenie założeń projektowych do opracowania prototypu narzędzia do kształtowania powierzchni kostnych. Jednakże, małym niedosytem jest brak uwzględnienia w tabeli 4.1 i zestawienia wszystkich wytycznych z nich

wynikających (z eksperymentu, symulacji i analizy teoretycznej). Autor ograniczył się jedynie do ogólnych założeń odnoszących się do poszczególnych zagadnień nie podając optymalnych parametrów. Przykładem mogą być założenia odnoszące się do sposobu skrawaniem, dla którego Autor podaje tylko, że powinno to być narzędzie o niezdefiniowanej geometrii wykonujące ruch oscylacyjny z możliwością podawania wody w przestrzeń obróbki. Niestety, nie podaje jakimi parametrami powinno się ono charakteryzować: jaka powinna być wielkość ziarna, by uzyskać odpowiednią głębokość obróbki, jaka częstotliwość ruchu narzędzia by skrawać z odpowiednią prędkością i wiele innych parametrów technologicznych. Przy innych zagadnieniach również brakuje podania szczegółowych założeń np. czego dotyczy sterowanie i jakie parametry mają być sterowane dla uzyskania efektywnej użyteczności projektowanego narzędzia do obróbki powierzchni kości. Mimo to, Autor z sukcesem opracował prototyp narzędzia, które na tle tak obiecujących wyników testów wydajności i użytkowania może mieć zastosowanie w praktyce klinicznej. Jednakże, uważam, że wytypowany przypadek kliniczny nie jest najlepszym wyborem, gdyż uzyskiwana narzędziem precyzja kształtowania powierzchni kostnych może być bardziej pożądana przy innych zabiegach. Doktorant widzi potrzebę dalszych badań, głównie dotyczących zjawisk zachodzących podczas obróbki skrawaniem i udoskonalania prototypu, więc proponuję by dokonał szerszego rozeznania jego stosowalności.

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 na ostatnim miejscu w wersie;
- wielokrotne występowanie braku spacji rozdzielającej wyrazy w wierszu;
- prezentowanie w małych rozmiarach większości rysunków i wykresów, zwłaszcza przedstawiających wyniki symulacji, co utrudnia odczyt opisów oraz legend i ich interpretację,
- odwołanie do nieistniejącego rys. 9.6 (str.107), czy zamiana kolejności rys. 3.1 z rys. 3.2 oraz pominięcie rys. 3.19 w spisie rysunków;
- stosowanie odmiennych zapisów kilku pozycji literaturowych m.in. [3], [120], [150], [164], [201].

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

5. Ocena końcowa

Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Paweł Zawadzki w sposób oryginalny analizuje istotny w chirurgii ortopedycznej problem obróbki skrawaniem powierzchni kostnych, co świadczy o dobrej wiedzy Doktoranta w szerokim zakresie m.in. dotyczącej budowy i fizjologii kości, metod badawczych oraz obliczeń numerycznych MES, a także projektowania CAD stosowanych w inżynierii mechanicznej. Pragnę zaakcentować szeroki zakres zrealizowanych badań zarówno eksperymentalnych, teoretycznych oraz modelowych, dostarczających nowej wiedzy, którą Doktorant efektywnie wykorzystał przy opracowaniu prototypowego narzędzia do kształtowania powierzchni kostnych. Opracowane narzędzie może mieć praktyczne zastosowanie i być wykorzystywane przy chirurgicznych zabiegach ortopedycznych do obróbki kości.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pawła Zawadzkiego 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 Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny pracy oraz oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w zakresie zastosowania wyników do praktyki klinicznej, a także zwracając uwagę na samą sylwetkę Doktoranta w aktywności naukowej, czego przykładem są trzy Autorskie publikacje zawarte w pracy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

Wzrostki