

Rzeszów, 29.12.2023

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów



Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. SPOSÓB PRECYZYJNEGO KSZTAŁTOWANIA POWIERZCHNI KOSTNYCH
Autor: mgr inż. Paweł Zawadzki
promotor: dr hab. inż. Rafał Talar
promotor pomocniczy: dr hab. n. med. Mikołaj Dąbrowski

Podstawa recenzji

Pismo dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej numer DIM.075.463.2023 z dnia 2 listopada 2023 roku o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Pawła Zawadzkiego w oparciu o dysertację pt. Sposób precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych.

1. Wprowadzenie

Rozwój inżynierii medycznej związany jest ściśle z integracją z innymi dyscyplinami naukowymi w tym inżynierii mechanicznej i inżynierii materiałowej. Prowadzenie precyzyjnych zabiegów operacyjnych i skrócenie czasu ich realizacji możliwe jest przy zastosowaniu narzędzi i procesów stosowanych w różnych dziedzinach nauki techniki. Jest również to bardzo istotne z punktu widzenia zdrowia pacjenta, przebiegu operacji, zmniejszenia kosztów operacji chirurgicznych i przyspieszenia rehabilitacji pooperacyjnej. Ludzki szkielet poddawany jest ciągłym obciążeniom wynikającym z normalnego funkcjonowania organizmu, często bywa przeciążany co może powodować odkształcenia i uszkodzenia. Innymi czynnikami powodującymi uszkodzenia szkieletu mogą być wypadki i urazy oraz czynniki chorobowe powodujące degradację tkanki kostnej. Leczenie urazów czy zmian chorobowych struktury kostnej w wielu przypadkach wymaga ingerencji chirurgicznej, która polega na wykonywaniu obróbki tkanki kostnej poprzez wiercenie, cięcie, piłowanie, łączenie struktur kostnych przy użyciu innych materiałów metalicznych i niemetalicznych charakteryzujących się odpowiednią biogodnością. Tkanka kostna stanowi specyficzny materiał, którego obróbka powinna być precyzyjna ponieważ późniejszy proces leczenia wpływa nie tylko na samą wytrzymałość układu kostnego ale

również komfort życia osoby leczonej związany zarówno z samym funkcjonowaniem jak też wyglądem pacjenta. Zagadnienie obróbki tkanki kostnej jest bardzo skomplikowane, ponieważ kości znajdujące się w żywym organizmie mają inne właściwości niż tkanki martwe, co dodatkowo komplikuje proces badawczy czy tworzenie modeli obróbkowych. Biorąc powyższe pod uwagę tematyka przedstawionej do recenzji dysertacji dotycząca badań i analizy precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych jest aktualna oraz uzasadniona pod względem naukowym i użytecznym, stanowi jednocześnie wyzwanie interdyscyplinarne w obszarze nauk medycznych i inżynierii mechanicznej.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedstawiona do oceny praca liczy 168, stron zawiera na początku spis treści wykaz oznaczeń i akronimów, streszczenie w języku polskim i angielskim, pięć ponumerowanych rozdziałów, załączniki, spis rysunków, spis tabel i bibliografię. Część merytoryczną stanowi pięć numerowanych rozdziałów. Bibliografia liczy 288 pozycji ułożonych w kolejności cytowania. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów jest ułożona prawidłowo tworzy spójny i logiczny układ, przedstawiane treści rozwijają i uzupełniają materiał zawarty w częściach poprzedzających, mimo że sam układ pracy, w którym teza poprzedza analizę stanu zagadnienia nie jest często spotykany w dysertacjach doktorskich. Praca zawiera materiał odpowiednio zilustrowany w tym rysunki, zdjęcia, schematy i wykresy, pozwalające na właściwą interpretację treści merytorycznej.

Pierwszy rozdział zatytułowany jako wstęp składa się z kilku podrozdziałów, począwszy od bardzo syntetycznego wprowadzenia do zagadnień opisujących zadania tkanki kostnej oraz problemy związane z jej obróbką. Następnie opisana została teza, cel i zakres pracy w ujęciu naukowym i użytecznym. Przedstawiono również plan pracy w postaci wyszczególnienia kolejnych zadań badawczych. Kolejne części rozdziału stanowią analizę stanu zagadnienia w odniesieniu do tkanki kostnej jako materiału biologicznego ujętego z perspektywy inżynierskiej. Analiza źródeł literaturowych odnosi się do funkcjonalności tkanki kostnej na poziomie organizmu, charakterystyki strukturalnej i mikrostrukturalnej tkanki kostnej oraz właściwości tkanki kostnej z punktu widzenia możliwości powstawania i propagacji pęknięć. Poddano analizie właściwości mechaniczne i fizyczne tkanki kostnej w tym gęstość, porowatość kości ludzkiej i wołowej. Rozpatrywano również anizotropowość tkanki kostnej oraz właściwości termodynamiczne. W końcowej części rozdziału przedstawiono przegląd zagadnień obróbki tkanki kostnej w odniesieniu do chirurgii ortopedycznej, w tym metody obróbki skrawaniem, wybranych narzędzi i oprzyrządowania operacyjnego stosowanego w chirurgii ortopedycznej i chirurgii twarzoczaszki.

Rozdział drugi stanowi główną, bardzo obszerną część eksperymentalną pracy podzieloną na pięć podrozdziałów w których przedstawiona jest charakterystyka realizowanych badań, opis skrawania ortogonalnego ostrzem o zdefiniowanej geometrii, ocena mechanizmu propagacji pęknięć w tkance kostnej zbitej, obróbka z zastosowaniem ziaren ściernych oraz ocena warunków termodynamicznych procesu obróbki tkanki kostnej. Przedstawiona jest również stosowana do eksperymentów aparatura badawcza, oraz metodyka badawcza. Jako materiał badawczy użyto próbek zwierzęcej tkanki

kostnej, co było podyktowane ograniczeniami związanymi trudną dostępnością próbek tkanki ludzkiej, a także ograniczeniami formalnymi wynikającymi z uzyskaniem zgody komisji bioetycznej na realizację badań. W celu realizacji badań parametrów – sił skrawania posłużono się literaturowymi modelami skrawania. Przeprowadzono badania współczynnika tarcia w strefie kontaktu narzędzia z tkanką, proces powstawania wiórów i morfologie powstawania wiórów. Istotnym elementem badań była analiza mechanizmu propagacji pęknięć tkanki kostnej podczas jej obróbki mechanicznej, wynikające z jej naturalnej podatności na kruche pęknięcia w warunkach gdy naprężenia średnie przenoszone przez tkankę kostną są mniejsze niż wartość granicy plastyczności dla małych odkształceń oraz dla ograniczonej absorpcji energii. Ciekawe zagadnienia badawcze stanowi również obróbka tkanki kostnej wykorzystująca ziarna ściernie. Eksperyment przeprowadzono w oparciu o założony plan badań w którym ujęto parametry obróbki, analizę zjawisk zachodzących podczas obróbki a także opracowanie wyników badań. Część badawczą rozdziału drugiego zamyka analiza zjawisk termodynamicznych zachodzących podczas obróbki tkanki kostnej, co jest bardzo istotne z punktu widzenia przebiegu operacji i samej obróbki a jednocześnie ma istotny wpływ na zdrowie pacjenta ze względu na ryzyko powstania zjawiska martwicy termicznej tkanki kostnej wywołanej podwyższoną temperaturą procesu obróbki.

Trzeci rozdział przedstawia proces modelowania numerycznego i fizycznego obróbki tkanki kostnej opartej modele materiałowe uwzględniające trzy rodzaje modeli: model izotropowy, model ortotropowy oraz model kompozytowy. Analizę modeli przeprowadzono w środowisku programu Ansys Explicit Dynamic w oparciu o tą samą formę geometryczną modeli ostrzy skrawających tkankę kostną. Badania modelowe pokazują istotność zagadnień związanych z procesem skrawania w zakresie inżynierii mechanicznej i inżynierii materiałowej w odniesieniu do jednorodności materiałów stosowanych dla analizowanych modeli.

Rozdział czwarty dotyczy opracowania prototypu narzędzia do obróbki powierzchni kostnych, dla którego założeniem konstrukcyjnym było wykonanie narzędzi obróbkowych wykorzystujących ostrza lub ziarna ściernie o niezdefiniowanej geometrii. Opracowanie konstrukcji narzędzia pozwalającego na obróbkę powierzchni kostnych, poprzedzone było analizą i doбором materiałów narzędziowych oraz parametrów obróbki. Dane dotyczące wydajności skrawania od rodzaju obrabianego materiału określono empirycznie, zgodnie z teoretycznymi zasadami ściernia w badaniach eksperymentalnych. Oparto się na założeniu, w którym dla większości materiałów konstrukcyjnych skrawalność definiuje się jako fizyczny związek między wskaźnikami wydajności procesu, a właściwościami mechanicznymi obrabianych materiałów. Właściwości te są uzależnione od poziomu naprężeń w różnych zakresach temperatury, prędkości, odkształcenia ściernego, geometrii narzędzia oraz stępienia ziaren. Projekt urządzenia do obróbki ścierniej dotyczył możliwości realizacji zabiegów klinicznych kręgosłupa dotyczących leczenia choroby Bastruupa.

Piąty rozdział przedstawia podsumowanie i wnioski w odniesieniu do przeprowadzonych badań, analizy wyników eksperymentów jako wartości naukowej wynikającej z realizacji dysertacji. Opisane są również wnioski o charakterze użytecznym mające na celu udoskonalanie zabiegów operacyjnych ratujących ludzkie zdrowie i życie. W rozdziale tym Autor sformułował również kierunki dalszych badań dotyczące

zagadnień obróbki skrawaniem powierzchni kostnych obejmujące porównanie mechanizmu skrawania tkanki kostnej naturalnej, ocenę wpływu porowatości na proces skrawania z wykorzystaniem obrazowania tomografem komputerowym oraz ocenę mechanizmu skrawania z zastosowaniem układu do mikroskopowej rejestracji obrazów.

W końcowej części pracy znajduje się sześć załączników przedstawiających parametry materiałowe zdefiniowane dla różnych modeli tkanki kostnej oraz dokumentację techniczną i wizualizację prototypu urządzenia do obróbki wyrostków kolczystych.

Literatura została ułożona w kolejności cytowania i zawiera pozycje książkowe, artykuły naukowe, materiały konferencyjne witryny internetowe o tematyce związanej z medycyną, inżynierią medyczną, inżynierią mechaniczną, inżynierią materiałową, stanowiące aktualne i związane z tematem pracy zestawienie.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy zagadnień interdyscyplinarnych, związanych z potrzebą opracowania parametrów obróbki oraz wyspecjalizowanego oprzyrządowania operacyjnego, przeznaczonego do realizacji zabiegów w obszarze chirurgii ortopedycznej.

Praca ma charakter badawczy, mimo to Autor przedstawił dwie tezy o charakterze użytecznym i naukowym, w których założył że możliwe jest zastosowanie narzędzia o niezdefiniowanej geometrii ostrzy do kształtowania powierzchni kostnych, opracowanego na podstawie analizy mechanizmów obróbki tkanki kostnej zbitej i zjawisk jej towarzyszących oraz modelu procesu obróbki uwzględniającego cechy i parametry materiałowe tkanki.

Celem zasadniczym pracy było opracowanie technik przeznaczonych do realizacji zabiegów chirurgii ortopedycznej oraz chirurgii twarzoczaszki, pozwalających swobodnie kształtować określone fragmenty układu kostno-szkieletowego za pomocą obróbki ścierniej w klinicznych warunkach operacyjnych. Dodatkowym celem było opracowanie prototypu badawczego urządzenia oraz narzędzia umożliwiającego obróbkę powierzchni kostnych. W zakresie celu naukowego przeprowadzono analizy badań eksperymentalnych, makroskopowych i mikroskopowych procesu skrawania tkanki kostnej z zastosowaniem ostrzy o zdefiniowanej i niezdefiniowanej geometrii.

Poddano analizie procesy fizyczne zachodzące podczas kontaktu ostrza z tkanką kostną, co pozwoliło na opracowanie opisowego i analitycznego modelu fizycznego procesu obróbki powierzchni kości, z uwzględnieniem narzędzia o ujemnym kącie natarcia. Realizacja badań pozwoliła na opracowanie trzech modeli materiałowych tkanki kostnej zbitej. Wykorzystując oprogramowanie oparte o metodę elementów skończonych przeprowadzono symulację procesów obróbki, co pozwoliło na analizę mechanizmów obróbki oraz określenie zgodności modelu z wynikami badań eksperymentalnych. Wyniki symulacji procesu obróbki powierzchni kostnych pozwoliły na realizację symulacji zjawisk zachodzących podczas skrawania.

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera wnikliwą ocenę analizy stanu zagadnienia dotyczącą właściwości fizycznych i mechanicznych tkanki kostnej, jej budowy strukturalnej i pełnionych funkcji. Dokonano również przeglądu metod obróbki stosowanych w chirurgii ortopedycznej oraz narzędzi i oprzyrządowania operacyjnego.

Na potrzeby badań, przyjęto że tkanka kostna wykazuje właściwości materiałów kompozytowych o charakterze ortotropowym. Przeprowadzono badania eksperymentalne, w których tkankę kostną zbitą pochodzenia zwierzęcego – wołowego poddano obróbce trzema metodami: skrawania ortogonalnego, pojedynczym ziarnem oraz zespołem ziaren ściernych. Zestawienia tabelaryczne pokazują właściwości tkanek kostnych różnego pochodzenia, jednak pojawia się pytanie, dlaczego Autor wybrał do badań wołową tkankę kostną a nie np. tkankę wieprzową, zwłaszcza, że niektóre źródła literaturowa pokazują bliższe podobieństwo właściwości tego typu tkanek do właściwości tkanek ludzkich.

Realizacja badań miała na celu analizę mechanizmu skrawania, poziomu emisji akustycznej, morfologii wiórów, mechanizmu propagacji pęknięć. Przedstawione zostały stanowiska i schematy badawcze wykorzystywane do badań, dla niektórych ilustracji rozmiar zdjęć mógłby być większy (rys. 2.2, 2.3, 2.7, 2.66), poprawiłoby to ich czytelność.

W części badawczej poddano analizie takie parametry jak: wypadkową siła skrawania, stan naprężenia, współczynnik tarcia, energię pęknięcia oraz odporność na pęknięcie. Autor w wielu przypadkach odnosi się do źródeł literaturowych umiejscawiając wyniki badań własnych na tle innych opracowań. W kilku miejscach powołuje się również na wyniki badań własnych opublikowanych wcześniej w czasopiśmie indeksowanych w bazach WoS i SCOPUS. Badania dotyczą się do mechanizmów skrawania ortogonalnego, odnoszącego się realizacji operacji z zastosowaniem takich narzędzi jak osteotom czy piła. Operacje na tkance kostnej często realizowane są z zastosowaniem wiercenia i pojawia się pytanie, czy Autor brał w ogólnej analizie pod uwagę tego typu procesy.

Istotnym elementem pracy badawczej jest pomiar i analiza współczynnika przewodności cieplnej w celu poznania mechanizmu skrawania tkanki kostnej dla modelu fizycznego odnoszącego się do różnej głębokości skrawania. W wyniku badań stwierdzono, że anizotropowa struktura kości oraz głębokość skrawania istotnie wpływają na zjawiska zachodzące podczas obróbki ubytkowej. Istotnym czynnikiem jest również podatność tkanki na propagację kruchych pęknięć za względu na sam proces obróbki jak też łączenia tkanek kostnych z innymi tkankami czy implantami.

Realizacja badań naukowych pozwoliła na osiągnięcie celu użytecznego, czyli opracowanie prototypów autorskiego systemu kształtowania powierzchni kostnych z zastosowaniem obróbki ścierniej. Prototypy poddano badaniom, które potwierdziły możliwość ich stosowania podczas zabiegów operacyjnych przy zachowaniu stabilności procesu obróbki oraz powtarzalności uzyskiwanej topografii powierzchni. Opracowane prototypy oraz narzędzia mogą być stosowane do obróbki powierzchni wyrostków kolczystych w leczeniu choroby Baastrupa, co stanowi ważny aspekt aplikacyjny pracy doktorskiej.

4. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy bardzo istotnych interdyscyplinarnych zagadnień z zakresu precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych. Temat pracy został wybrany w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Układ formalny pracy jest prawidłowy, zawiera odpowiednią bibliografię i odsyłacze do materiału ilustracyjnego. Rozprawa odnosi się do aktualnej wiedzy, wnosi treści nowe w obszarze badań naukowych i aplikacji w obszarze medycyny klinicznej i inżynierii mechanicznej. Praca składa się z syntetycznej części teoretycznej będącej jednocześnie analizą stanu zagadnienia oraz części badawczej i analizy wyników badań będącej podstawą realizacji założonego i osiągniętego celu naukowego. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne pozwalające na prowadzenie prac badawczych o charakterze naukowym i aplikacyjnym. Cele badawcze zostały osiągnięte a opracowana analiza wyników badań stanowi oryginalny wkład w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Zawadzkiego pt. Sposób precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych, spełnia wymagania ustawy: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Dodatkowo, uważam że przeprowadzenie interdyscyplinarnych badań, istotnych z punktu widzenia medycyny oraz inżynierii mechanicznej odznacza się oryginalnością zastosowanych metod badawczych. Opracowanie analizy wyników charakteryzujących się wysokim poziomem naukowym oraz wykonanie prototypu urządzenia bazującego na przeprowadzonych badaniach i przeznaczonego do wdrożenia w celu wykonywania operacji w warunkach klinicznych posiada wyjątkowe walory poznawcze i aplikacyjne. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej o wyróżnienie dysertacji.

Grzegorz Budniński