

Łódź, dn. 31. 03. 2024 r.

dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. uczelni
Politechnika Łódzka



Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Zawadzkiego
pt.: „Sposób precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych”

*Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki
Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, z dn. 31.01.2024 r.*

1. Ocena wyboru tematu

Recenzowana rozprawa doktorska zatytułowana: *Sposób precyzyjnego kształtowania powierzchni kostnych*, zawiera interesującą propozycję usprawnienia procesu obróbki powierzchniowej materiałów kostnych, wspartą interdyscyplinarną wiedzą z zakresu nauk medycznych oraz wiedzą i wynikami badań z inżynierii mechanicznej. Doktorant zamieścił w rozprawie obszerną charakterystykę tkanki kostnej jako materiału biologicznego poddanego obróbce mechanicznej, określił główne wymagania i ograniczenia występujące w procesie obróbki tkanki kostnej oraz zaproponował sposób ich rozwiązania. Sformułował poprawne tezy rozprawy, jej cel naukowy i użyteczny oraz przedstawił kompleksowy plan realizowanych zadań badawczych, obejmujących badania eksperymentalne i modelowanie numeryczne procesów skrawania tkanki kostnej.

Oceniam podejmowaną w rozprawie problematykę badawczą jako oryginalną i nowoczesną, wychodzącą naprzeciw współczesnym oczekiwaniom, zwłaszcza lekarzy i pacjentów chirurgii ortopedycznej. Temat rozprawy oceniam jako aktualny, ważny i celowy szczególnie ze względów społecznych oraz poznawczych i aplikacyjnych.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska jest zwartym opracowaniem zawierającym 198 stron tekstu, w tym: 107 rysunków i 34 tabele oraz 6 załączników. Zasadniczą treść rozprawy poprzedzają: podziękowania, spis treści, wykaz najważniejszych symboli oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Merytoryczną część rozprawy otwiera wstęp, po którym następują 4 rozdziały z poprawnie wydzielonymi podrozdziałami, zakończone wnioskami końcowymi. Pracę zamyka: 6 załączników, spis rysunków i tabel oraz bibliografia. Przyjęty układ rozprawy oraz jej podział na rozdziały i podrozdziały oceniam jako przejrzysty i poprawny.

Wstęp - zawiera wprowadzenie do rozprawy (1.1), opis tkanki kostnej jako materiału biologicznego w zagadnieniach inżynierskich (1.2) oraz przegląd zagadnień obróbki tkanki kostnej we współczesnej chirurgii ortopedycznej (1.3). W podrozdziale 1.1 przedstawiono: specyficzne cechy tkanki kostnej i problemy związane z jej obróbką (pkt. 1.1.1), tezę, założenia i cele rozprawy (pkt. 1.1.2) oraz sekwencje realizacji planowanych sześciu zadań badawczych (pkt. 1.1.3). W kolejnym podrozdziale 1.2 opisano na podstawie literatury: funkcjonalne cechy tkanki kostnej w organizmie (pkt. 1.2.1), charakterystykę struktury i mikrostruktury tkanki kostnej (pkt. 1.2.2), właściwości fizyko-mechaniczne tkanki kostnej i zjawiska propagacji pęknięcia (pkt. 1.2.3), anizotropowość tkanki kostnej (pkt. 1.2.4) oraz jej właściwości termodynamiczne (pkt. 1.2.5). W końcowym podrozdziale 1.3 zamieszczono skrótowy przegląd literatury dotyczącej: wskazań do przeprowadzenia zabiegów chirurgii tkanki kostnej i metod leczenia (pkt. 1.3.1), metod obróbki skrawaniem stosowanych w chirurgii ortopedycznej (pkt. 1.3.2) oraz opis narzędzi i oprzyrządowania operacyjnego stosowanego w badaniach eksperymentalnych. Treści zawarte w tym rozdziale oceniam pozytywnie, natomiast uwagi szczegółowe dotyczą:

- nadmiernie rozbudowanego tekstu wstępu (16 str.), w którym niektóre punkty i podrozdziały mogły stanowić odrębne rozdziały, np. punkty: 1.1.2, 1.1.3, 1.2, 1.3,
- zbyt skromnej prezentacji opisu wyników badań literaturowych innych autorów w pkt. 1.2, 1.3,
- braku podsumowania i wniosków z analizowanej literatury (w pkt. 1.2 i 1.3.), uzasadniających celowość podjęcia tematu rozprawy,
- dyskusyjne są tezy rozprawy, zwłaszcza teza użyteczna, która jest jednym z głównych celów rozprawy.

Rozdział drugi zawiera obszerny opis badań eksperymentalnych (63 str.) przedstawionych w pięciu podrozdziałach. Podrozdział 2.1 zawiera charakterystykę

przeprowadzonych badań eksperymentalnych. W punkcie 2.1.1 scharakteryzowano materiał badawczy, którym była zwierzęca kość udowa, podano wymiary próbek, sposób przygotowania i warunki przechowywania próbek w płynie Ringera. W punkcie 2.1.2 opisano stanowiska badawcze wykorzystywane do badań eksperymentalnych, w tym: tribotester Bruker UMT, czujniki do pomiaru siły skrawania, stanowisko do pomiaru przewodności cieplnej tkanki kostnej oraz wymieniono dziewięć innych przyrządów i urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w tych badaniach. Niedosyt budzi brak opisu przeznaczenia innych wymienionych przyrządów i urządzeń pomiarowych oraz brak opisu obrabiarek, na których realizowano procesy skrawania tkanki kostnej. W kolejnym podrozdziale 2.2 zamieszczono opis badań procesu skrawania ortogonalnego tkanki kostnej. We wprowadzeniu (pkt. 2.2.1) scharakteryzowano skrótowo na podstawie literatury stan badań (tab. 2.1), zamieszczono schemat planowanych badań (rys. 2.4), charakterystykę geometrii ziaren ściernych (rys. 2.5÷2.6), geometrię ostrzy skrawających zaprojektowanych narzędzi ze stali szybko tnącej i parametry skrawania (tab. 2.2) oraz podano sposób obserwacji i rejestracji obrazu skrawania za pomocą mikroskopu optycznego z kamerą. W punkcie 2.2.2 przedstawiono schemat zmodyfikowanego modelu Merchanta dotyczącego oddziaływania ostrza narzędzia na strefę skrawania ortogonalnego, wydzielono obszary występowania zjawisk fizycznych zachodzących w tej strefie (rys. 2.8) oraz podano podstawowe zależności określające siłę skrawania i jej składowe, współczynnik tarcia, opór skrawania (2.1÷2.13). W kolejnym punkcie 2.2.3 zamieszczono wyniki badań procesów skrawania tkanki kostnej ostrzami skrawającymi o zdefiniowanej geometrii oraz dyskusję tych badań. Wyniki badań obejmują przebiegi zmian: wypadkowej siły skrawania i jej składowej (rys. 2.10÷2.12), siły ścinającej (rys. 2.13), oporu skrawania (rys. 2.14) i współczynnika tarcia (rys. 2.15÷2.16, tab. 2.3÷2.4), w zależności od wartości kątów natarcia ostrzy narzędzi i głębokości skrawania. Prezentowane wyniki badań opatrzone obszerną dyskusją i stosownymi komentarzami. W punkcie 2.2.4 przedstawiono mechanizm powstawania wiórów w procesie skrawania tkanki kostnej oraz ich morfologię. Dla scharakteryzowania procesu tworzenia wiórów zastosowano jednoczesny pomiar w procesie skrawania siły skrawania i emisji akustycznej. Zamieszczono przykładowy wykres przebiegów siły skrawania - F_c oraz sygnału emisji akustycznej - AE z uwzględnieniem 3 przebiegów funkcji toru l (rys. 2.17) oraz wydzielono 3 obszary, którym przyporządkowano różne postacie wióra: 1 - wióry łamane i fragmentaryczne, 2 - wióry łukowe i spiralne, 3 - wióry ciągłe. Na kolejnych wykresach przedstawiono wyniki pomiarów AE , które dotyczą porównania AE procesów formowania wiórów przy skrawaniu wiórów ortogonalnych w kierunku prostopadłym, poprzecznym i równoległym (rys. 2.18), przy skrawaniu wiórów ortogonalnych

w kierunku równoległym przy stałej głębokości skrawania i różnych kątach natarcia (rys. 2.19) oraz przy skrawaniu wiórów ortogonalnych w kierunku prostopadłym i trzech różnych głębokości skrawania (rys. 2.20). Poprawność interpretacji prezentowanych na tych rysunkach utrudnia różna wartość przedziałów skali, np. na rys. 2.17 skala AE wynosi $0\div 8$ i skala l od $0\div 3000$, na rys. 2.18 skala AE wynosi od $-0,5\div 1$ i skala l od $0\div 4500$, rys. 2.19 skala AE wynosi od $-1\div 3$ i skala l od $0\div 2000$. Morfologię różnych postaci wiórów powstających w procesie skrawania tkanki kostnej zobrazowano na fotografii (rys. 2.21) oraz scharakteryzowano w tabeli 2.5. W punkcie 2.2.5 zamieszczono podsumowanie wyników badań skrawania ortogonalnego ostrzem o zdefiniowanej geometrii, które sformułowane jest poprawnie. Dyskusyjne są natomiast niektóre stwierdzenia: na str. 54₁₅ „Minimalna grubość nieobrobionego wióra ...” i str. 54₉ „Nowatorstwo badań ... potwierdza możliwość zastosowania obróbki ścierniej do skrawania tkanki korowej”.

W podrozdziale 2.3 przedstawiono ocenę mechanizmu propagacji pęknięć w tkance kostnej w procesie skrawania. Zamieszczono wizualizację propagacji pęknięć tkanki kostnej w procesie skrawania (rys. 2.26), przy stosowaniu trzech różnych głębokości skrawania ($a_p = 10, 50, 175 \mu\text{m}$), w której wyróżniono trzy przebiegi pęknięć: nieregularny $a_p > 100 \mu\text{m}$, regularny a_p - około $50 \mu\text{m}$ oraz zmienny $a_p < 10 \mu\text{m}$. Wskazano na istotny wpływ geometrii ostrza narzędzia, zwłaszcza kąta natarcia γ oraz orientacji krawędzi skrawającej względem struktury kości na propagację pęknięć tkanki kostnej (rys. 2.27÷2.29). Przeprowadzono również obszerną analizę wpływu siły skrawania i jej składowych na propagację pęknięć (rys. 2.30÷2.36), dla różnych parametrów skrawania (a_p, γ) w trzech kierunkach orientacji osteonów (prostopadłym, równoległym i poprzecznym). W zakończeniu podrozdziału (pkt. 2.3.3) zamieszczono podsumowanie oraz tabelaryczne zestawienie zidentyfikowanych pęknięć w poszczególnych próbach badań eksperymentalnych (tab. 2.6).

W podrozdziale 2.4 zawarto opis wyników badań procesu obróbki struktur kostnych pojedynczym ziarnem i zespołem ziaren ściernych (pkt. 2.4.1÷2.4.5). W krótkim wprowadzeniu (pkt. 2.4.1) zamieszczono uzasadnienie prowadzonych badań oraz stosowane narzędzia ściernie i procedury badawcze. W punkcie 2.4.2 przedstawiono plan badań składowych modelu obróbki tkanki kostnej, schemat obróbki wgłębnikiem diamentowym traktowanym jako pojedyncze ziarno ściernie (rys. 2.38), stosowane warunki skrawania (tab. 2.8), mechanizm obróbki pojedynczym ziarnem ściernym i schemat propagacji pęknięć podczas skrawania, zależności matematyczne (2.14÷2.23) przyjęte do parametrycznej oceny mechanizmu obróbki oraz przykładowe wyniki badań. Wyniki badań obejmują m.in.: pomiary eksperymentalne procesu skrawania pojedynczym ziarnem ściernym i wartości wskaźników K_c i G_F (tab. 2.9),

wykresy zmian wskaźnika Kc (rys. 2.40), obrazy rys powstających na tkance kostnej (rys. 2.43÷2.45), wykresy przekrojów rys poprzecznych dla trzech kierunków obróbki oraz parametry geometryczne rys (tab. 2.10) i parametry chropowatości powierzchni tkanki kostnej (tab. 2.11). Prezentowane wyniki badań opatrzone są stosownymi komentarzami, natomiast uwagi szczegółowe do tego podrozdziału dotyczą:

- braku uszczegółowienia wymiarów geometrycznych diamentowego wgłębnika (rys. 2.38), w tym masy kryształu diamentu, liczby krawędzi, usytuowana krawędzi w procesie skrawania oraz wartości kąta wierzchołkowego diamentu,
- wątpliwości budzi skrawanie ostrzem o promieniu zaokrąglenia wierzchołka diamentu $200\ \mu\text{m}$ i zastosowanie głębokości skrawania $25\div 75\ \mu\text{m}$ oraz podana wartość kąta natarcia $\gamma=30^\circ$,
- wyjaśnienia wymaga sformułowanie na str. 699: „Zarówno cała J, jak i prawo efektu wielkości ... w trakcie testów zarysowania”.

W punkcie 2.4.3 przedstawiono opis procesu obróbki tkanki kostnej narzędziem z zespołem ziaren ściernych. Zawarto w nim m.in.: plan badań mających na celu opracowanie wytycznych do zbudowania prototypu narzędzia ściernego (rys. 2.46), opis przygotowania narzędzia ściernego, podano wymiary ziaren z elektrokorundu zwykłego i węgla krzemu do budowy narzędzia ściernego (tab. 2.13), metodę przeprowadzonego eksperymentu procesu ścierania (rys. 2.47), parametry eksperymentu ścierania (tab. 2.14) oraz zamieszczono przykładowe wyniki badań. Wyniki badań obejmują: pomiary siły stycznej w procesie oscylacyjnego ścierania tkanki kostnej na sucho i w obecności wody (tab. 2.15), wykresy przebiegu zmian wartości składowej siły Fr w procesie ścierania, średnie i maksymalne głębokości penetracji ziaren w tkankę kostną (tab. 2.16), obrazy powierzchni kości udowej przed obróbką i po obróbce ścierną (rys. 2.49), wykres głębokości penetracji ziaren ściernych w tkankę kostną w czasie skrawania (rys. 2.50), obrazy powierzchni narzędzi ściernych przed i po obróbce na sucho i w obecności wody (rys. 2.51), obrazy tkanki kostnej po obróbce na sucho i w obecności wody (rys. 2.52÷2.53) oraz obrazy powierzchni narzędzia ściernego po obróbce z zalegającymi wiórami i fragmentami tkanki kostnej (rys. 2.54). Prezentowane wyniki badań zawierają logiczne opisy i komentarze, natomiast uwagi szczegółowe do tego punktu dotyczą:

- skrótowego opisu zastosowanego narzędzia ściernego, nie podano np. kształtu ziaren ściernych i ich kątów wierzchołkowych, sposobu selekcjonowania, topografii czynnej powierzchni narzędzia, w tym np. liczności ziaren, odległości pomiędzy ziarnami,

- niepełnego opisu metody eksperymentu procesu ścierania i rys. 2.47, ponieważ nie ujawniono podstawowych parametrów kinematycznych procesu skrawania. Wątpliwości budzi zastosowana w badaniach mała prędkość skrawania oraz podawanie różnych wartości prędkości skrawania: w tekście na stronie 761 podano $v_x = 240$ m/min, natomiast w tabeli 2.14 jest $v_x = 4$ m/min,
- wątpliwości budzi wykres przebiegu zmian siły skrawania - F_r w zależności od siły nacisku - F_N oraz jego interpretacja (rys. 2.48),
- dyskusyjnym jest zbyt liczna obecność ziaren ściernych osadzających się na tkance kostnej (rys. 2.52÷2.53).

W kolejnym punkcie 2.4.4 kontynuowano opis procesu obróbki narzędziem z zespołem ziaren ściernych w ujęciu celu utylitarnego. W początkowej jego części zaprezentowano skrótowo technologię wykonywania narzędzia ściernego na korpusie z tworzywa poliaktydowego (PLA) i ziarnami SiC i BFA, spojonymi spoiwem żywicznym metodą druku 3D. Przedstawiono widok urządzenia DMU i narzędzia ściernego wykorzystywanego do badań procesu obróbki ściernej (rys. 2.56) oraz przykładowe wyniki pierwszego etapu badań, obejmujące pomiary składowych siły skrawania (F_x i F_z) w czasie obróbki (rys. 2.55) i obraz powierzchni kości udowej po obróbce z widocznymi pozostałościami ziaren ściernych (rys. 2.57). Na podstawie uzyskanych wyników tego etapu badań stwierdzono zbyt słabe utwierdzenie ziaren ściernych na powierzchni czynnej narzędzia. W kolejnym etapie badań przedstawiono ulepszoną wersję narzędzia ściernego na korpusie metalowym z ziarnami cBN spojonymi spoiwem metalowym (rys. 2.58). Przeprowadzone testy szlifowania tkanki kostnej tego typu narzędziem (rys. 2.59 i rys. 2.60) potwierdziły znacznie korzystniejsze efekty obróbkowe, w tym: wzrost wydajności szlifowania możliwość zwiększenia prędkości skrawania (do 3000 mm/min). Interesującym rozwiązaniem byłoby sprawdzenie wariantu narzędzia ściernego z ziarnami diamentowymi, które są materiałem biogodnym. W końcowej części tego punktu zaprezentowano ocenę skrawania narzędziami ściernymi w kształcie klina i wałka z kanalikami do przepływu wody. Zaprezentowano prototyp głowicy ściernej (rys. 2.61), wyniki testów jej zużycia (tab. 2.17), obrazy powierzchni kości udowych po obróbce (rys. 2.62), wykresy topografii powierzchni tkanki kostnej po obróbce (rys. 2.63) oraz obrazy powierzchni ściernicy z widocznymi fragmentami tkanki kostnej i zużyciem ziaren ściernych (rys. 2.64). W punkcie 2.4.5 zamieszczono podsumowanie badań i testów eksperymentalnych oraz 11 wniosków szczegółowych, które były pomocne w pracach konstrukcyjnych nad opracowaniem prototypu urządzenia do obróbki powierzchni kostnych.

Podrozdział 2.5 zawiera ocenę warunków termodynamicznych obróbki tkanki kostnej.

W kolejnych punktach zamieszczono: krótkie wprowadzenie (2.5.1), wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej zbitej tkanki kostnej metodą porównawczą (2.5.2), ocenę emisji ciepła w procesie skrawania (2.5.3) oraz ryzyko wystąpienia martwicy termicznej tkanek (2.5.4) oraz podsumowanie dotyczące temperatury skrawania tkanki kostnej w ujęciu ogólnym, sformułowano 3 wnioski poznawcze (2.5.5). W punkcie 2.5.2 zamieszczono podstawowe zależności literaturowe dotyczące współczynnika przewodności ciepłej (2.25÷2.27) oraz wyniki badań wartości tego współczynnika dla różnych tkanek zwierzęcych (rys. 2.65 i tab. 2.18). Zabrakło jednak opisu metodyki tych badań. W kolejnym punkcie 2.5.3 przedstawiono interesujące pomiary temperatury skrawania w strefie kontaktu narzędzia z tkanką kostną za pomocą termopary typu K (rys. 2.66) oraz kamery termowizyjnej (rys. 2.67÷2.69). Nie ujawniono jednak sposobu wzorcowania termopary oraz emisyjności kamery termowizyjnej, zwłaszcza dla tkanki kostnej. W punkcie 2.5.4 zaprezentowano ciekawą próbę modelowania temperatury skrawania w tkance kostnej za pomocą oprogramowania Ansys, którą zobrazowano wizualizacją wyników na rysunku 2.70. Dyskusyjnym jest stwierdzenie na str. 95₁₀ „*Pomimo zastosowanie ... wysokiej prędkości skrawania ($v_c = 1000$ mm/s) temperatura skrawania nie przekraczała 90°C ”.* W zakończeniu tego podrozdziału (pkt. 2.5.5) sformułowano trzy wnioski poznawcze dotyczące temperatury skrawania zbitej tkanki kostnej w ujęciu ogólnym.

Pozytywnie oceniam prezentowane w rozdziale drugim bardzo obszerne i wielostronne badania eksperymentalne, dyskusję wyników badań oraz sformułowane wnioski szczegółowe. Niedosyt budzi natomiast brak zastosowania w tych badaniach eksperymentu planowanego.

Rozdział trzeci zatytułowany - „*Modelowanie numeryczne i fizyczne obróbki tkanki kostnej*” - obejmuje trzy podrozdziały dotyczące: modelowania numerycznego skrawania obróbki tkanki kostnej (3.1), porównania modeli numerycznych (3.2) oraz model fizyczny skrawania tkanki kostnej narzędziem o ujemnym kącie skrawania (3.3).

We wstępie podrozdziału 3.1 scharakteryzowano skrótowo trzy modele numeryczne zbitej tkanki kostnej, obejmujące model izotropowy, ortotropowy i kompozytowy, które następnie analizowano komputerowo w oprogramowaniu Ansys Explicit Dynamics. W punkcie 3.1.1 zamieszczono wybrane wyniki analizy modelowania procesu skrawania ortogonalnego, na podstawie modelu izotropowego. Przedstawiono wyniki analizy modelowania dotyczące wpływu kąta natarcia ostrza na kształt wiórów i średnią temperaturę w strefie kontaktu wióra z ostrzem skrawającym (tab. 3.1, rys. 3.1÷3.2), stanu zredukowanych naprężeń ścinających (rys. 3.3) oraz maksymalnej energii pęknięcia (rys. 3.4). Prezentowane wyniki analizy opisano obszernym i logicznym komentarzem. W punkcie 3.1.2 zaprezentowano istotę ortotropowego

modelu zbitej tkanki kostnej, z uwzględnieniem literaturowego kryterium Tsai-Wu, szereg równań w postaci wyznaczkowej i zależności matematycznych opisujących właściwości materiałowe tkanki kostnej wzdłuż trzech ortogonalnych osi (3.1÷3.23) oraz wyznaczono współczynniki Tsai-Wu (tab. 3.2). W kolejnym punkcie 3.1.3 zaprezentowano modelowanie procesu skrawania tkanki kostnej z wykorzystaniem modelu ortogonalnego. Na podstawie przeprowadzonej symulacji komputerowej wyznaczono naprężenia ściskające i zredukowane w tkance kostnej w trzech kierunkach (rys. 3.6). W punkcie 3.1.4 przedstawiono istotę kompozytowego modelu zbitej tkanki kostnej oraz jego schemat (rys. 3.7). W kolejnym punkcie 3.1.5 zamieszczono opis modelowania procesu skrawania ortogonalnego z zastosowaniem modelu kompozytowego oraz przykład symulacji procesu skrawania tkanki kostnej (rys. 3.8) ujawniający 3 etapową propagację pęknięcia (rys. 3.8), tj.: inicjację odkształcenia tkanki kostnej, kumulację naprężeń oraz pęknięcie i utworzenie wióra elementowego.

W podrozdziale 3.2 zamieszczono porównanie analizowanych modeli, tabelaryczne porównanie przykładowych wyników danych eksperymentalnych i wyników z analiz numerycznych (tab. 3.3), które potwierdziło zadowalającą zgodność wyników. W zakończeniu tego podrozdziału zamieszczono jego skrótowe podsumowanie.

W kolejnym podrozdziale 3.3 zaprezentowano opis fizycznego modelu procesu skrawania tkanki kostnej narzędziem o ujemnym kącie natarcia. Zamieszczono, opracowany na podstawie literatury, schemat modelu procesu skrawania (rys. 3.9) oraz przykładowe wyniki z obserwacji i badań eksperymentalnych procesu skrawania tkanki kostnej. Prezentowane wyniki badań obejmują: obrazy strefy skrawania zbitej tkanki kostnej dla różnych głębokości skrawania (rys. 3.10) i obrazy formowanych wiórów (rys. 3.11), symulacje numeryczne odkształceń plastycznych w strefie skrawania (rys. 3.12), obliczenia wartości siły ścinającej dla różnych głębokości skrawania (tab. 3.4 i rys. 3.13) oraz symulacje komputerowe rozkładu naprężeń lokalnych w strefie „stagnacji” (rys. 3.14) i naprężeń ścinających w strefie ścinania dla trzech kierunków orientacji ostrza względem osteonów (rys. 3.15). Poszczególne wyniki badań są na ogół wyczerpująco opisane i opatrzone logicznymi komentarzami. W punkcie 3.3.1 przedstawiono obszerny opis modelu mechanizmu powstawania wióra w procesie skrawania tkanki kostnej. Opisano tryb całkowitego odkształcenia tkanki kostnej w strefie skrawania (rys. 3.16), tryb skrawania ścinająco - pękającego (rys. 3.17 i zależności matematyczne 3.26÷3.34) oraz tryb skrawania pękającego (rys. 3.18 i zależności 3.35÷3.45). W punkcie 3.3.2 przedstawiono walidację modelu na podstawie zależności opracowanych w punkcie 3.3.1. Zawiera ona określenie wartości naprężeń ścinających dla trzech kierunków orientacji ostrza

(tab. 3.5), wartości parametrów wejściowych opracowanego modelu (tab. 3.6 i rys. 3.20) oraz opracowanie zbiorczych wykresów walidacji modelu skrawania tkanki kostnej (rys. 3.21).

Prezentowane modelowanie numeryczne procesu skrawania tkanki kostnej oceniam pozytywnie, ponieważ wnosi ono niewątpliwie szereg nowych, istotnych informacji o zjawiskach zachodzących w strefie skrawania i mechanizmie formowania wiórów, w nietypowym procesie obróbki materiału jakim jest tkanka kostna. Uwagi szczegółowe do tego rozdziału dotyczą mylnej numeracji rysunku 3.1 na stronie 101 oraz braku podsumowania i wniosków.

Rozdział czwarty zawiera opis opracowanego prototypu urządzenia i narzędzia ściernego do obróbki powierzchni kostnych. We wprowadzeniu 4.1 uzasadniono celowość zastosowania narzędzi ściernych do obróbki powierzchniowej tkanek kostnych oraz celowość opracowania prototypu narzędzia ściernego i urządzenia do jej realizacji w warunkach leczenia operacyjnego.

W podrozdziale 4.2 opisano przypadek kliniczny układu kostnego spowodowany chorobą Baastrupa oraz metody jej leczenia, w tym leczenia operacyjnego polegającego na wyrównywaniu lub usunięciu wyrostków kolczastych z powierzchni kości wyrostków kolczastych. Zawarte argumenty w tym podrozdziale również uzasadniają celowość opracowania i aplikacyjnego zastosowania prototypu narzędzia ściernego wraz z urządzeniem funkcjonalnym do chirurgicznych zabiegów operacyjnych.

W kolejnym podrozdziale 4.2 przedstawiono podstawowe założenia projektowe do konstrukcji narzędzia ściernego wraz z urządzeniem funkcjonalnym oraz opisano ich cechy użytkowe. W kolejnym podrozdziale 4.3 opisano klasyfikację zgodności wyrobu z normami europejskim (pkt. 4.3.1), ocenę biologiczną zgodności z normą ISO 10993 (pkt. 4.3.2) oraz schemat wytwarzania narzędzia ściernego - ściernicy (pkt. 4.3.2). W punkcie 4.3.3 opisano projekt urządzenia, obejmujący dwa warianty konstrukcyjne różniące się kształtem, wymiarami gabarytowymi i napędem (rys. 4.3). Pierwszy z tych wariantów umożliwiał montaż urządzenia w uchwytach aparatury laboratoryjnej wyposażonej np. w robot manipulacyjny, natomiast drugi wariant dostosowany do obsługi manualnej przez chirurga. Dokumentację konstrukcyjną projektowanych urządzeń przedstawiono w załącznikach 4÷5, natomiast obrazy kształtów zaprojektowanych głowic ściernych przedstawiono na rysunkach 4.4÷4.5. Niedosyt budzi brak wymiarów gabarytowych głowic ściernych, ziarnistości i wymiarów ziaren ściernych oraz topografii ich rozmieszczenia na czynnej powierzchni narzędzia. W kolejnym punkcie 4.3.4 opisano technologię wytwarzania prototypowego urządzenia (tab. 4.4) oraz głowicy ścierniej (tab. 4.5). W podrozdziale 4.4 przedstawiono skrótowe informacje o badaniach wydajności

i użytkowaniu prototypu urządzenia do obróbki wyrostków kolczastych. Zamieszczono widok stanowiska badawczego (rys. 4.6), przykładowy wykres siły skrawania (rys. 4.7), podano przykładową wydajność obróbki tkanki kostnej dla pięć-minutowego zabiegu operacyjnego oraz obrazy obrobionej tkanki kostnej (rys. 4.8). W końcowym podrozdziale 4.5 omówiono precyzję kształtowania tkanki kostnej (rys. 4.9), wspartą pomiarami chropowatości powierzchni (tab. 4.6) oraz wizualizacją topografii powierzchni tkanki kostnej (rys. 4.10).

Rozdział piąty zawiera podsumowanie rozprawy i wnioski końcowe (5.1), ocenę prototypowego urządzenia (5.2) oraz kierunki dalszych badań (5.3). W podsumowaniu scharakteryzowano główne części rozprawy. Sformułowano następnie 10 wniosków końcowych o znaczeniu użytkowym i poznawczym, które mają zróżnicowany stopień ważności i szczegółowości. Należy uznać, że podsumowanie wraz sformułowanymi wnioskami w dużej części potwierdzają osiągnięcie przez Doktoranta zamierzonych celów rozprawy oraz sformułowane hipotezy badawcze. W zakończeniu rozprawy wskazano również na trzy ogólne kierunki prowadzenia dalszych badań.

Bibliografia stanowi bardzo obszerny wykaz literatury obejmujący 288 pozycji, pochodzących z artykułów czasopism krajowych i zagranicznych, referatów zamieszczonych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych, monografii i podręczników. Poszczególne pozycje bibliograficzne są na ogół właściwie dobrane i poprawnie cytowane w tekście rozprawy. Należy podkreślić aktualność bibliografii, ponieważ większość pochodzi z okresu ostatnich 6 lat. Doktorant jest również autorem 2 i współautorem 2 publikacji zagranicznych.

3. Ocena strony redakcyjnej

Oceniając rozprawę doktorską pod względem redakcyjnym należy podkreślić, że tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, układ pracy i jej podział na rozdziały i podrozdziały jest na ogół poprawny, a zamieszczone rysunki, fotografie i wykresy są czytelne. Rozprawa napisana jest na ogół poprawnie pod względem językowym. Doktorant nie ustrzegł się jednak błędów gramatycznych i interpunkcyjnych oraz niefortunnych sformułowań i określeń, które zaznaczono w tekście rozprawy.

Zawarte w recenzji uwagi krytyczne mają na charakter dyskusyjny, do których Doktorant może się odnieść podczas publicznej obrony.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska ma charakter interdyscyplinarny z zakresu inżynierii biomedycznej i inżynierii mechanicznej oraz wnosi istotne wartości poznawcze, a zwłaszcza

aplikacyjne w obszarze doskonalenia procesu obróbki tkanek kostnych. Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- obszerną analizę literatury dotyczącej metod obróbki tkanki kostnej stosowanej we współczesnej chirurgii ortopedycznej,
- zaprojektowanie stanowiska badawczego, dobór nowoczesnej aparatury pomiarowej oraz opracowanie metodyki badań eksperymentalnych procesu obróbki skrawaniem i ścierniej tkanki kostnej,
- modelowanie numeryczne procesu skrawania tkanki kostnej z zastosowaniem modeli fizycznych,
- opracowanie prototypu urządzenia i narzędzia ściernego do obróbki ścierniej tkanki kostnej,
- sformułowanie logicznych wniosków poznawczych i użytkowych potwierdzających osiągnięcie celów badawczych,
- opracowanie dwóch samodzielnych i dwóch współautorskich publikacji w czasopiśmie zagranicznych.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Pawła Zawadzkiego zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Doktorant wykazał się wymaganą wiedzą oraz umiejętnościami w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz przedstawiania uzyskanych wyników badań.

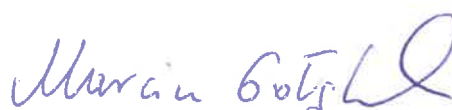
Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Pawła Zawadzkiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w: art. 187 ust. 1-3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Zawadzkiego może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Pawła Zawadzkiego do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę interdyscyplinarny zakres zrealizowanych badań eksperymentalnych i ich walory użytkowe, wykazane w recenzji osiągnięcia naukowe oraz wysoko punktowane publikacje Doktoranta, wnioskuję także o wyróżnienie rozprawy.

Łódź, dn. 31.03.2024 r.



dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. uczelni