

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Łukasza RYPINY

pt. *Analiza i modelowanie procesów mikroskrawania stopów tytanu*

Recenzję wykonano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, Pana dr. hab. inż. Czesława Łukianowicza, prof. PK z dnia 29.04.2016 r. (L.dz. PK/WM/Dz/6/302/2016)

1. Ocena doboru tematu rozprawy doktorskiej i celu rozprawy.

Tematyka rozprawy obejmuje ważne zagadnienia mikroskrawania stopów tytanu. Procesy te odgrywają istotną rolę w kształtowaniu wyrobów, w stosunku do których narzucono wysokie wymagania dotyczące kształtu, dokładności wymiarowej oraz jakości powierzchni. Spełnienie tych wymagań ma istotny, pozytywny wpływ na ich konkurencyjność na rynku. Dlatego możliwie najlepsza wiedza o procesach mikroskrawania jest niezwykle pożądana.

Procesy mikroskrawania są trudne z punktu widzenia badań eksperymentalnych i analizy teoretycznej z powodu zróżnicowanego kształtu i przestrzennej orientacji ziaren ściernych, zmian stereometrii ziaren na czynnej powierzchni ściernicy oraz zmian obrabianej powierzchni, zmiennych oporów właściwych skrawania i wielu innych czynników natury geometrycznej, kinematycznej, dynamicznej, materiałowej, itp. Obserwacja zjawisk zachodzących w mikroobjętościach w otoczeniu krawędzi skrawających ziaren, zwłaszcza w otoczeniu ich wierzchołków, przy zmiennej głębokości ich zanurzenia w obrabianym materiale, jest trudna, nawet jeśli dysponuje się układem optycznym z szybką kamerą cyfrową. Jeszcze trudniejszy jest pomiar ważnych parametrów fizycznych charakteryzujących zjawiska zachodzące w trakcie mikroskrawania. Z tego powodu bardzo ważne staje się stworzenie wiarygodnych modeli konstytutywnych obrabianych materiałów oraz stosownych modeli matematycznych i obliczeniowych pozwalających odwzorować zjawiska styku narzędzia z obrabianym materiałem, oraz przepływu i oddzielania materiału, które prowadzą do powstawania wypyłek i wiórów.

Z ww. powodów tematykę rozprawy doktorskiej należy uznać za ciekawą, aktualną i ważną, zwłaszcza z punktu widzenia właściwej realizacji procesu mikroskrawania w praktyce

produkcyjnej. Sformułowane w punkcie 3.1 na str. 46 cele pracy, zorientowane na poszerzenie wiedzy o procesie mikroskrawania stopu tytanu Ti-6Al-4V, należy uznać za w pełni uzasadnione.

2. Analiza formalnej i merytorycznej strony treści rozprawy.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska obejmuje 206 stron, na które składają się strona tytułowa, spis treści, wykaz najważniejszych oznaczeń, 7 rozdziałów numerowanych, lista cytowanych publikacji oraz streszczenie w języku angielskim.

W **rozdziale 1.** stanowiącym wprowadzenie do tematyki dysertacji Autor nazywa najważniejsze aspekty dotyczące mikroskrawania i podejmowane dalej w pracy doktorskiej. Ponadto, w ogólnym zarysie, przedstawia strukturę dysertacji i w skrócie opisuje metodykę badań eksperymentalnych.

W **rozdziale 2.** Autor analizuje stan wiedzy na podstawie dostępnej literatury. W szczególności Doktorant podaje zaczerpnięte z cytowanej literatury najważniejsze informacje dotyczące: procesów mikroskrawania, charakterystyk kształtu i właściwości ziaren ściernych oraz opisu i modelowania czynnych powierzchni narzędzi ściernych. Analizując różne publikacje Doktorant wskazuje na dwa ważne obszary badań – badań dotyczących makrogeometrii powierzchni ściernicy, związanej z ukształtowaniem powierzchni ściernicy podczas jej wytwarzania i późniejszego kondycjonowania oraz mikrogeometrii ściernicy, obejmującej analizę kształtu i rozmieszczenie ostrzy skrawających ziaren ściernych. Następnie przedstawia m.in. omówienie szeregu prac dotyczących zagadnień modelowania topografii powierzchni narzędzi ściernych oraz powierzchni materiałów uzyskiwanych po obróbce ściernej. W dalszej kolejności opisuje właściwości stopów tytanu a w szczególności stosowanego dalej w badaniach eksperymentalnych stopu Ti-6Al-4V oraz podaje ogólną charakterystykę procesów skrawania stopów tytanu. Ponadto Doktorant wymienia i zwięźle opisuje stosowane przez różnych autorów metody modelowania procesów mikroskrawania. Modele topografii czynnej powierzchni ściernicy przydatne w badaniach symulacyjnych zostały zwięźle scharakteryzowane przez Autora m.in. w postaci przejrzystej tabeli, zawierającej zarówno opis głównej idei danej metody jak i możliwe obszary jej zastosowań w symulacji procesu szlifowania.

Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy literatury wskazują na rozbieżności między wynikami badań doświadczalnych a teoretyczną długością strefy szlifowania, obliczaną wg różnych opublikowanych modeli teoretycznych. Ponadto, uwidaczniają one niedoskonałości dotychczas opublikowanych metod oceny aktywności ziaren oraz oddziaływań naroży ziaren

ściernych z obrabianym materiałem w strefie kontaktu. To stanowi bardzo dobre uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej ujętej w dysertacji.

Analiza literatury została wykonana starannie i wystarczająco wnikliwie. Zakres cytowanych prac jest szeroki. Należy podkreślić, że Autor potrafił właściwie zrelacjonować osiągnięcia zawarte w najważniejszych cytowanych publikacjach oraz we właściwy sposób dokonać syntezy przedstawionych informacji. Szereg cytowanych prac zostało opublikowanych w ostatnich 6 latach, co podkreśla aktualność tematyki dysertacji oraz potwierdza, iż Doktorant posiada najnowszą wiedzę dotyczącą badanych przez siebie procesów mikroskrawania.

Cele pracy i problemy do rozwiązania zostały opisane w **rozdziale 3.** dysertacji. Główny cel pracy został określony jako wyznaczenie wpływu kinematyki oraz parametrów geometrycznych kontaktu pojedynczego ziarna ściernego na wielkość wyływek oraz wartości odkształceń i naprężeń w strefie pracy ziarna. Jest on moim zdaniem prawidłowo sformułowany i uzasadniony w świetle wniosków wynikających z analizy literatury.

Doktorant sformułował dwie hipotezy. **Pierwsza hipoteza** dotyczy wpływu parametrów geometrycznych ostrza a zwłaszcza wpływu kształtu i kątów pochylenia fragmentów powierzchni natarcia na efektywność procesu mikroskrawania. **Druga** stanowi przypuszczenie, że energochłonność procesu mikroskrawania, odniesiona do objętości usuniętego materiału, zależy od względnej objętości wyływek oraz częstotliwości poślizgów w strefie tworzenia wióra, które uzależnione są z kolei od warunków obróbki. W celu udowodnienia słuszności postawionych hipotez naukowych Doktorant zdefiniował pięć problemów naukowych. Są nimi:

1. Definiowanie cech stereometrycznych naroży ziaren ściernych.
2. Wyznaczanie i ocena przydatności wskaźników zdolności ziaren do usuwania materiału obrabianego.
3. Dobór cech modeli dla różnych materiałów obrabianych.
4. Określenie wpływu cech materiału na zmienność naprężeń i odkształceń w procesie mikroskrawania.
5. Określenie cech mikroskrawania agregatami ziaren.

Uważam, że w kontekście potrzeby wykazania słuszności sformułowanych hipotez ww. problemy naukowe zostały zdefiniowane prawidłowo.

Metodyka rozwiązywania ww. problemów oraz uzyskane wyniki i wyciągnięte wnioski są przedstawione w dalszej części dysertacji. Doktorant zastosował modelowanie i symulację procesów mikroskrawania stopu tytanu Ti-6Al-4V (Grade 5), stopu aluminium w stanie wyżarzonym oraz ceramiki alundowej. Wyniki tych badań zawierają rozdziały 4. i 6. Ponadto Autor wykonał badania eksperymentalne mikroskrawania, których wyniki zawierają rozdziały 5. i 6.

Najbardziej obszerny rozdział dysertacji, **rozdział 4.**, dotyczy modelowania procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym. Kształt ziarna ściernego użytego do symulacji określono w wyniku skanowania jego cech stereometrycznych za pomocą triangulacyjnego skanera ATOS III SO i odwzorowania jego struktury z użyciem odpowiedniej siatki ośmiowęzłowych elementów skończonych, dostępnych w przyjętym w obliczeniach komercyjnym systemie obliczeń Ansys, bazującym na metodzie elementów skończonych (MES).

W omawianym rozdziale zawarto także szereg analiz dotyczących stanów naprężeń oraz odkształceń w strefie kontaktu naroża ściernego z obrabianym materiałem a także wpływu cech stereometrycznych mikronaroży ziaren ściernych na przemieszczenia szlifowanego materiału, w tym m.in. formowanie wypływek bocznych oraz przemieszczenia obrabianego materiału w mikroobjętościach w otoczeniu naroży ziaren ściernych. Przedstawiono również wyniki symulacji procesu mikroskrawania w warunkach obniżonej temperatury obrabianego materiału.

Wykonane symulacje i analizy procesu mikroskrawania doprowadziły Doktoranta do sformułowania dwóch sposobów zmniejszania bocznych przemieszczeń materiału. Pierwszy sposób polega na znalezieniu właściwej orientacji ziarna w stosunku do kierunku ruchu ziarna. Symulacje wykonano na przykładzie losowo wybranego ziarna. Istotą drugiego sposobu zmniejszenia bocznych przepływów szlifowanego materiału jest odpowiedni dobór ziaren ściernych o najkorzystniejszych cechach stereometrycznych naroża, do których Doktorant zalicza kąty γ i ε , szerokości a_p , b_z , (b_1+b_2) , a także promienie r i R , pokazane na rys. 4.53-4.55 znajdujących się na str. 111 i 112 dysertacji.

W rozdziale 4. Doktorant przeprowadził również analizy symulacyjne powstawania naprężeń i formowania wiórów oraz wypływek w przypadku trzech materiałów o różnych właściwościach mechanicznych (stopu aluminium w stanie wyżarzonym, stopu tytanu Ti-6Al-4V (Grade 5) oraz ceramiki alundowej). Ponadto opisał wyniki symulacji procesów mikroskrawania stopu tytanu Ti-6Al-4V w obniżonej temperaturze. Symulacje przedstawione w rozdziałach 4. oraz 6., wykonane zostały z użyciem komercyjnego systemu MES Ansys. W obliczeniach numerycznych przyjęto model materiału Johnsona-Cooka, model najczęściej stosowany w symulacjach procesów obróbki ubytkowej. Do rozwiązania zagadnienia przemieszczeń zastosowano procedury jawnego całkowania równań ruchu. *Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność sformułowanej w rozdziale 3. pierwszej hipotezy. Uwagi dotyczące modelowania i symulacji są przedstawione w dalszej części recenzji.*

Badania eksperymentalne dotyczące mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym przedstawiono w **rozdziale 5.** dysertacji. Dotyczyły one ziaren o czterech różnych kształtach scharakteryzowanych wymiarami liniowymi i kątowymi reprezentującymi określone cechy stereometryczne. Kształty ziaren zostały zmierzone z użyciem triangulacyjnego skanera ATOS III

SO i oprogramowania stosowanego w inżynierii rekonstrukcji Geomagic Studio oraz programu komputerowego wspomaganie prac inżynierskich CAD Inventor. Procesy mikroskrawania były rejestrowane za pomocą szybkiej kamery cyfrowej Phantom V210. Zastosowany w badaniach układ optyczny umożliwia szybką akwizycję obrazu i dalszą analizę procesu formowania wiórów ze 100-krotnym powiększeniem. Ślady obróbki oraz mikrowióry zostały zmierzone z użyciem mikroskopu konfokalnego i profilometru.

Metodyka pomiaru kształtów ziaren oraz rys powstałych w procesach mikroskrawania oraz kształtu i wymiarów wiórów jest prawidłowa, a zastosowane urządzenia badawcze oraz oprogramowanie pozwalają na przeprowadzenie potrzebnych do dalszych analiz pomiarów. Należy stwierdzić, że w kontekście postawionych zadań badawczych dobrano je właściwie.

Wyniki badań eksperymentalnych zostały w kolejnym etapie badań porównane z wynikami badań symulacyjnych wykonanych w systemie Ansys z użyciem ośmiowęzłowych elementów skończonych i przyjętego poprzednio modelu materiałowego Johnsona-Cooka dla stopu tytanu Ti-6Al-4V (Grade 5). *Fakt, iż w badaniach modelowych i eksperymentalnych zaobserwowano duże podobieństwo w procesie formowania wiórów w kontekście ich kształtu i wymiarów świadczy o tym, iż zbudowane przez Doktoranta modele MES, służące symulacji procesu mikroskrawania, są odpowiednie do rozwiązania postawionych zadań.*

W **rozdziale 6.** zawarte są wyniki badań procesów mikroskrawania w nowych obszarach zastosowań, wymienionych w tytule projektu badawczego zrealizowanego pod kierownictwem Pana Profesora dr. hab. inż. dr. h.c. Wojciecha Kacalaka w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Projekt pt. „Innowacyjne, hybrydowe narzędzia ściernie do obróbki stopów metali lekkich”, był realizowany w ramach programu „Innotech” w ścieżce programowej IN-TECH i był finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Można domyślać się, że Doktorant wykonał w ramach tego projektu przedstawioną w podrozdziale 6.4 symulację procesu mikroskrawania z użyciem mikroagregatów ściernych. Osiągnięte w ramach wykonania ww. projektu wyniki wskazują na korzystny wpływ zastosowania ściernic z mikroagregatami do szlifowania stopu tytanu Ti-6Al-4V (Grade 5) na:

1. ograniczenie lub wyeliminowanie tworzenia zalepień na czynnej powierzchni ściernicy;
2. lepszą stabilność procesu szlifowania, wynikającą z mniejszych różnic wartości chwilowych siły szlifowania oraz obniżenia wartości średniej siły szlifowania;
3. obniżenie zwiększania się sił szlifowania wraz z upływem czasu obróbki, co przekłada się na poprawę trwałości narzędzi ściernych;
4. zmniejszenie wartości naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej.

Powyższe wnioski, do uzyskania których wkład wniósł także Doktorant, są bardzo cenne oraz wskazują na dużą przydatność poznawczą i aplikacyjną badań naukowych wykonanych przez

zespół kierowany przez Pana Profesora dr. hab. inż. dr. h.c. Wojciecha Kacalaka. Należy również podkreślić, iż wyniki te zostały opublikowane w wielu artykułach autorstwa członków zespołu badawczego i przedstawione podczas konferencji naukowych, w szczególności podczas obrad Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej. Zarówno publikacje, jak i prezentacje zyskały duże uznanie w środowisku specjalistów z zakresu obróbki ściernej.

Rozdział 4., dotyczący modelowania i symulacji procesów mikroskrawania, oraz rozdział 5., prezentujący wyniki badań eksperymentalnych procesu mikroskrawania stopu tytanu Ti-6Al-4V (Grade 5), zostały zakończone wnioskami. Wnioski końcowe ujęto w **rozdziale 7.** dysertacji. Wymieniono tam 11 wniosków poznawczych, 2 wnioski dotyczące wykorzystania wyników pracy i 4 wnioski odnoszące się do dalszych badań. *Można ocenić, że podane w rozdziale 7. wnioski końcowe znajdują swoje uzasadnienie w wynikach pracy badawczej, choć niektóre z nich wymagają moim zdaniem doprecyzowania, wyjaśnionego w dalszej części recenzji.*

Spis literatury obejmuje 180 pozycji, z czego 80 pozycji wydano w latach 2000-2016 a 40 pozycji wydano latach 2010-2016. Spis literatury obejmuje zarówno książki, jak i artykuły naukowe opublikowane w czasopismach specjalistycznych. *Analizując przegląd literatury zawarty w rozdziale 2 oraz dane bibliograficzne podane w spisie literatury można więc stwierdzić, że spis literatury jest merytorycznie odpowiedni i aktualny.*

Umieszczone na końcu dysertacji **streszczenie w języku angielskim** dostarcza informacji o najważniejszych elementach dysertacji. Mimo istnienia pewnych niedociągnięć natury lingwistycznej właściwie reprezentuje istotę rozprawy.

Sformułowane w dysertacji wnioski wskazują na to, że Autor poszerzył stan wiedzy w odniesieniu do zadań objętych zakresem pracy i ma świadomość tego, w których kierunkach – Jego zdaniem – mogą być prowadzone dalsze badania, zmierzające do dalszego doskonalenia procesów mikroskrawania metali, w szczególności stopów tytanu.

Rozprawa doktorska napisana jest poprawnym językiem i generalnie jest czytelna, jednak Autor nie ustrzegł się w zakresie redakcji i języka pewnych niedociągnięć lub błędów, których natura jest bliżej wyjaśniona w dalszej części recenzji.

3. Oryginalne osiągnięcia Doktoranta.

Za oryginalne osiągnięcia Doktoranta, uzyskane w trakcie badań prowadzonych pod kierunkiem promotora Pana dr. hab. inż. Tomasza Królikowskiego, profesora PK, i promotora

pomocniczego Pana dr. inż. Dariusza Lipińskiego oraz w zespole badawczym kierowanym przez Pana Profesora dr. hab. inż. dr. h.c. Wojciecha Kacalaka można uznać:

1. określenie trójwymiarowych modeli geometrycznych ziarna ściernego, uwzględniających wybrane cechy stereometryczne naroży ziaren;
2. zbudowanie modeli obliczeniowych, wykorzystujących metodę elementów skończonych, które pozwalają obliczyć przemieszczenia obrabianego materiału próbki oraz pole naprężeń dla zadanego kształtu i orientacji ziarna ściernego.
3. wyznaczenie i ocenę przydatności wskaźników zdolności ziaren ściernych do usuwania obrabianego materiału;
4. określenie wpływu cech materiału na zmienność wartości naprężeń i odkształceń w procesie mikroskrawania.

4. Ocena ogólna.

Przyjęty do realizacji temat rozprawy doktorskiej jest **samodzielnym zadaniem naukowym**. Jego rozwiązanie wymagało od Doktoranta umiejętności analizy danych literaturowych, znajomości zagadnień technologii, modelowania zjawisk mechanicznych z użyciem metody elementów skończonych, umiejętności prowadzenia pomiarów geometrycznych i modelowania w systemie komputerowego wspomagania prac inżynierskich CAD, znajomości metodologii prowadzenia badań oraz umiejętności samodzielnego ich prowadzenia. **Całość rozprawy oceniam pozytywnie.**

5. Uwagi krytyczne lub dyskusyjne do rozprawy.

Lektura rozprawy doktorskiej skłania do sformułowania następujących uwag krytycznych lub dyskusyjnych.

1. Uzasadnienie **słuszności** drugiej hipotezy dysertacji powinno być bardziej precyzyjnie opisane. Doktorant stwierdził na str. 189, że decydujące znaczenie dla energochłonności procesu mikroskrawania agregatem ściernym mają cechy geometryczne, które w znaczący sposób utrudniają i zmniejszają boczne przemieszczenia materiału. Te zaś zależą m.in. od

tego, czy mikroskrawanie wykonywane jest pojedynczym ziarnem, a w tym od jego cech stereometrycznych i geometrycznej orientacji w stosunku do kierunku obróbki, czy też mikroagregatem ściernym. Jednak w rozprawie nie ma wyraźnie wyeksponowanych wyników obliczeń energii mikroskrawania i porównania ich wartości.

2. Na str. 46 napisano, że „Opracowane zostaną podstawy matematyczne procesów mikroskrawania stopów tytanu w różnych warunkach”. W dysertacji nie przedstawiono opracowanych przez Autora podstaw matematycznych procesów mikroskrawania stopów tytanu w różnych warunkach. Nie umniejsza to jednak uzyskanych przez Autora wyników, których znaczenie oceniam wysoko.
3. Wartości parametrów modelu materiałowego mają istotny wpływ na wyniki obliczeń MES. Skąd pochodzą wartości parametrów umieszczone w tabeli na str. 50 oraz w tabeli 4.1 na str. 63, użyte w obliczeniach MES?
4. Na str. 57 w opisie modelu fizycznego zawarto stwierdzenie o następującej treści. „Porównując bilans energetyczny obróbki wiórowej narzędziami skrawającymi (nóż tokarski, frez itd.) do szlifowania okazuje się, że w tej pierwszej wióry odprowadzają większą ilość ciepła powstającego w procesie skrawania, natomiast w drugiej przeważająca ilość ciepła wnika w przedmiot obrabiany.” Trudno zgodzić się z tą opinią, gdyż wiele badań i publikacji wykazuje, że także w przypadku toczenia lub frezowania stopu tytanu Ti-6Al-4V znaczna ilość ciepła powstającego w strefie skrawania wnika w narzędzie. To jeden z większych problemów związanych ze skrawaniem ww. stopu tytanu i szeregu innych stopów tytanu.
5. Stwierdzenie zawarte na str. 70, brzmiące „O dużej amplitudzie i częstości naprężeń normalnych w kierunku Z świadczy sposób oddzielania się materiału, oraz formowania bocznych przemieszczeń materiału.” wymaga bliższego wyjaśnienia.
6. Jakie jest uzasadnienie przyjęcia modelu obliczeń współczynnika k zgodnie ze wzorami (4.16) podanymi na str. 79?
7. W jaki sposób obliczono współczynniki podane we wzorach na str. 80?
8. Na str. 93 Autor pisze, że „W symulacji komputerowej zastosowano różne modele materiałowe ...”. Z dalszej części pracy wynika, że model materiałowy był modelem Johnsona-Cooka, ale dla różnych materiałów przyjęto różne wartości współczynników

modelu, które podano w tabeli 4.4. Źródło danych zawartych w tabeli 4.4 powinno być podane w postaci odpowiedniego cytowania.

9. Zawarte na str. 172 i 192 stwierdzenie „Analiza komputerowa mikroskrawania pojedynczymi ziarnami ściernymi z wykorzystaniem danych z eksperymentu, wykazała poprawność doboru modelu konstytutywnego.” powinno być precyzyjniej wyjaśnione w kontekście uzyskanych wyników badań. Czy Autor ma na myśli porównanie wyników analizy komputerowej z wynikami badań eksperymentalnych?
10. Czy energia właściwa obróbki, o której Doktorant pisze na str. 188 była w jawny sposób obliczana? Jeśli tak, to w jaki sposób ją obliczano?

6. Uwagi formalne odnoszące się do redakcji rozprawy.

1. Opisane w rozprawie badania dotyczyły stopu Ti-6Al-4V, stopu aluminium w stanie wyżarzonym i ceramiki alundowej. Być może, w tym świetle, odniesienie w tytule rozprawy do „stopów tytanu” powinno być sformułowane w liczbie pojedynczej.
2. Wskazane byłoby, aby praca zawierała streszczenie także w języku polskim.
3. Istniejące streszczenie pracy w języku angielskim powinno być umieszczone na numerowanej stronie i wykazane (podobnie jak streszczenie w języku polskim) w spisie treści rozprawy.
4. W rozdziale 1. nie ma sensu tworzenie jedyne podrozdziału 1.1. – zbędna jest numeracja 1.1.
5. Indeksy na rysunkach 3.2 i 3.3 powinny być napisane większą czcionką, gdyż obecne są mało czytelne.
6. Opisy osi wykresów na str. 51 są nieczytelne.
7. Tekst zawarty w podrozdziale 4.1.2 powinien precyzyjniej określać metodykę badań. Stwierdzenie mówiącym, że „Przyjęto metodę badań procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym stopów tytanu” powinno być bliżej wyjaśnione w kontekście tego co i w jaki sposób będzie badane.
8. Stwierdzenie zawarte na str. 56, brzmiące „Symulacja pozwoli wyznaczyć rozkłady odkształceń i naprężeń w obrabianym materiale a także przeprowadzić analizy zakresu

badania symulacyjnych, które zostały opisane w punkcie 4.1.1.” jest zbyt zawile, szczególnie jeśli wziąć pod uwagę, że cytowany w punkcie 4.1.1. na str. 55 „Zakres badań symulacyjnych procesu mikroskrawania” obejmuje m.in. kilka punktów, których treść dotyczy analiz różnych zjawisk.

9. Autor często stosuje w dysertacji słowa „narzędzia”, w odniesieniu do programów umożliwiających przetwarzanie danych. Zdecydowanie bardziej wskazane byłoby używanie słowa „programy”.
10. Podpis pod rys. 4.3 na str. 61 nie odpowiada zawartości tego rysunku. Rysunek ten przedstawia raczej ogólny zarys metodyki badań oraz wyjaśnia przepływ informacji związanej z określeniem cech ziarna ściernego i procesu mikroskrawania. Nie jest to literalnie „System oceny cech geometrycznych ziarna ściernego”.
11. Niepotrzebnie przypomina Autor w kilku miejscach dysertacji podstawowe właściwości modelu materiału Johnsona-Cooka. Przykładowo, informacje o cechach modelu materiału Johnsona-Cooka podane na str. 66, 73, 92, 101 są powtórzeniem informacji wymienionych wcześniej na str. 63. Zbędne jest także powtarzanie na str. 66, 73, 92, 97, 101 informacji o tym, że zastosowana w symulacjach metoda całkowania jawnego zwana jest „... również metodą różnic centralnych lub metodą explicit”, skoro napisano to już na str. 63.
12. Na str. 73 Autor napisał, że „...posłużono się metodą całkowania jawnego zwaną również metodą różnic centralnych bądź metodą explicit, która opisana została równaniem 4.13.”. Niezależnie od braku potrzeby powtarzania alternatywnej nazwy metody całkowania jawnego należy zauważyć, że błędnie wskazano równanie 4.13, które nie jest równaniem opisującym metodę całkowania jawnego, a równaniem różniczkowym ruchu ciała.
13. Na str. 75 Autor napisał „...W pracy wykazano, że podczas skrawania ziarnem w kształcie piramidy wartości k były mniejsze, gdy ziarno było zwrócone piramidą w kierunku skrawania.” Brak jest cytowania pracy, w której pracy to wykazano.
14. Na str. 77 akapit „Do analizy cech geometrycznych zastosowano szereg narzędzi mających zastosowanie w inżynierii rekonstrukcji tj. triangulacyjny skaner ATOS III SO, pakiet narzędzi Geomegic Studio, Inventor oraz system Ansys. Zastosowanie wszystkich wymienionych systemów pozwoliło skupić się na pomiarach geometrycznych zeskanowanych ziaren oraz opisać ich charakterystyczne cechy stereometryczne $r_1, 2\varepsilon_1$.” jest powtórzeniem wcześniej podanych informacji.

15. Podpisy pod rysunkami 5.49 i 5.50 są identyczne a treści tych rysunków różnią się. Podobnie jest w przypadku rys. 5.52 i 5.53.
16. Z treści pracy na str. 168 wynika, że rys. 5.56 dotyczy ostrza oznaczonego ZS3, a nie ZS2, jak to podano w podpisie rys. 5.56. Po przyjęciu tej korekty również i w tym przypadku podpisy pod rys. 5.55 i 5.56 staną się identyczne a treści rysunków różnią się.
17. Wniosek nr 5 na str. 192 brzmi „Stwierdzono, że amplituda zmiany naprężeń jest większa dla materiałów o małej plastyczności i dużej wytrzymałości.” Wskazane byłoby napisać w stosunku do materiałów o jakich właściwościach dokonuje się ww. porównania.
18. Wskazane byłoby podać w dysertacji bliższe dane dotyczące używanych programów, np. numer zastosowanej wersji programu. Dotyczy to zwłaszcza programu Ansys, którego rola w modelowaniu i symulacji procesu mikroskrawania stopu tytanu Ti-6Al-4V jest tak znacząca w badaniach opisanych w dysertacji. Ponadto, w treści rozprawy powinny się znaleźć, choćby w jednym miejscu, odnośniki wskazujące na twórców używanego oprogramowania lub firmy odpowiedzialne za dane oprogramowanie.

19. Drobne błędy natury językowej podano poniżej.

Na str. 13 zamiast „... ma wzrost” powinno być „... ma wpływ wzrost”.

Na str. 35 zamiast „...sinusoida o dużej fali i amplitudzie charakteryzuje się położeniem ziaren ściernych w kierunku osiowym” powinno być „...sinusoida o dużej długości fali i amplitudzie charakteryzuje położenie ziaren ściernych w kierunku osiowym”.

Na str. 53 zamiast „... postawania” powinno być „... powstawania”.

Na str. 67 zamiast „... następuje spadek znaczny spadek naprężeń” powinno być „...następuje znaczny spadek naprężeń”.

Na str. 77 zamiast „...Zastosowanie innowacyjnych narzędzi pomiarowych pozwalają dokładnie przyjrzeć się skuteczności mikroskrawania ...” powinno być „...Zastosowanie innowacyjnych narzędzi pomiarowych pozwala dokładnie przyjrzeć się skuteczności mikroskrawania ...”

Na str. 150 zamiast „Wraz ze wzrostem ...” powinno być „Wraz ze wzrostem ...” oraz zamiast „... potwierdzają, że głównym wpływem na formowanie ...” powinno być „... potwierdzają, że główny wpływ na formowanie ...”.

Na str. 191 zamiast „Poznanie jak największej ilości zjawiska zachodzących w strefie mikroskrawania ...” powinno być „Poznanie jak największej liczby zjawisk zachodzących w strefie mikroskrawania ...”

Na str. 206 zamiast „This paper ...” powinno być „This thesis ...”. Ponadto, zamiast „... using data on specific abrasives ...” powinno raczej być „... using data concerning specific abrasives ...” lub „... using data representing specific abrasives ...”, itp.

7. Wniosek końcowy.

Mimo przedstawionych uwag oceniam rozprawę pozytywnie. Uważam, że **recenzowana rozprawa doktorska reprezentuje aktualną i ważną, zwłaszcza dla praktyki przemysłowej, tematykę. Rozprawa jest wartościowa i wnosi nową wiedzę do dyscypliny naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn” w odniesieniu do procesów mikroskrawania stopów tytanu.**

Doktorant wykazał umiejętność analizy literatury, sformułowania planu badań, użycia metody elementów skończonych, a w szczególności systemu Ansys do zbudowania modelu numerycznego oraz wykonania symulacji. Potrafił przygotować stanowisko pomiarowe, zastosować programy inżynierii rekonstrukcyjnej i komputerowego wspomaganie prac inżynierskich CAD oraz wykonać pomiary i przeanalizować wyniki. Wykazał się także umiejętnością myślenia analitycznego i syntetycznego oraz pisanie dysertacji. Należy tu podkreślić, że wykonanie w ramach pracy doktorskiej zarówno badań symulacyjnych, jak i eksperymentalnych oraz porównanie otrzymanych wyników **świadczy bardzo korzystnie** o zrealizowanej pracy badawczej Doktoranta. Ponadto, godna uznania jest umiejętność współpracy Doktoranta z innymi badaczami, na co wskazuje współpraca Doktoranta z promotorem, Panem dr. hab. inż. Tomaszem Królikowskim, profesorem PK i promotorem pomocniczym Panem dr. inż. Dariuszem Lipińskim oraz udział Doktoranta w pracach zespołu badawczego kierowanego przez Pana Profesora dr. hab. inż. dr. h.c. Wojciecha Kacalaka.

W rezultacie wykonanych badań, opisanych w dysertacji, Doktorant doprowadził do osiągnięcia postawionych celów. Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Rypiny pt. *Analiza i modelowanie procesów mikroskrawania stopów tytanu* **spełnia wymagania** Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora z dnia 22 września 2011 r. (Dz. U. Nr 204, poz. 1200) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.