

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Rypiny nt.: „**Analiza i modelowanie procesów mikroskrawania stopów tytanu**”

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Królikowski, prof.PK

Promotor pomocniczy: dr inż. Dariusz Lipiński

Podstawa opracowania: pismo L.dz.PK/WM/Dz/6/302/2016, z dnia 29 kwietnia 2016 r.
Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej.

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 205 stron, a w tym: 2 strony spisu treści, 1 strona wykazu ważniejszych oznaczeń, 12 stron spisu literatury (180 pozycji); dodatkowo 1 strona streszczenia w j. angielskim. Praca składa się z 7 rozdziałów.

We wprowadzeniu – rozdział 1 Autor przedstawia genezę pracy, podkreślając złożoność procesu dekohezji materiału w precyzyjnej obróbce ścierniej, spowodowaną specyficznymi warunkami w strefie obróbki, na które wpływają: właściwości narzędzi ściernych, zróżnicowana geometria naroży ziaren ściernych, duże prędkości skrawania, zmienne opory właściwe skrawania. Słusznie pisze Autor rozprawy, iż „... *znajomość odkształceń, naprężeń oraz przemieszczeń obrabianego w procesie mikrooddzielania materiału, pozwolą uzyskać wiele cennych informacji na temat zjawisk zachodzących w procesie mikroskrawania*”. Pomimo tych trudności modelowanie przemieszczeń materiału w strefie mikroskrawania ma duże znaczenie poznawcze, bowiem zbadanie tych zjawisk w eksperymencie fizycznym jest bardzo problematyczne, a w większości przypadków praktycznie niemożliwe. Doktorant krótko charakteryzuje warunki pracy ostrzy ziaren ściernych i zawartość rozprawy.

Biorąc pod uwagę poznawcze znaczenie i potencjalny zakres zastosowania wyników badań w warunkach przemysłowych, wybór tematu pracy doktorskiej uznaję za w pełni trafny i uzasadniony do podjęcia.

W rozdziale 2 (s.7 – s.45) Doktorant przedstawia stan badań z zakresu tematu rozprawy w świetle analizy literatury. Autor kolejno analizuje badania dotyczące:

- procesu mikroskrawania, odnosząc je do proponowanych modeli i metod badań przez różnych autorów na przestrzeni od 1966 do 2015 roku (rys.2.1 – rys. 2.3.) W tej grupie prac znaczącą pozycję zajmują badania prowadzone w zespole prof. Kacalaka ((rys.2.4 – rys.2.6.), a jednym z istotnych aspektów jest wyróżnienie charakterystycznych obszarów w strefie mikroskrawania, w których występuje tworzenie i oddzielanie wióra, a także w określonych warunkach mogące się tworzyć boczne wypływki;
- charakterystyki kształtu i właściwości ziaren ściernych (rys.2.7 – rys.2.13 oraz tab.2.1.);
- czynnej powierzchni narzędzi ściernych (rys.2.4 – rys.2.18) z dominującym udziałem prac zespołu prof. Kacalaka. Zwracają uwagę oryginalne badania z zastosowaniem teorii fraktali, analiz częstości składowych, przekształceń falkowych, analiz statystycznych, zastosowań teorii chaosu i teorii katastrof;

- właściwości stopów tytanu, które z uwagi na bardzo dobre właściwości mechaniczne (tab.2.2 – tab.2.3) są szeroko stosowane w różnych konstrukcjach przemysłowych;
- charakterystyki procesów skrawania stopów tytanu. Materiały te należą do grupy trudnoskrawalnych z uwagi na ich właściwości mechaniczne i fizyczne. Przykładowo badania procesów szlifowania stopu Ti6Al4V wskazują na spajanie i zgrzewanie pomiędzy powierzchnią czynną ściernicy a powierzchnią obrabianą (rys.2.21.) Słabe odprowadzanie ciepła i wysoka temperatura w strefie skrawania sprzyjają przyspieszonemu zużyciu ostrzy (rys.2.22) oraz pogorszeniu właściwości warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu;
- metod i wyników modelowania procesów mikroszlifowania. Problem symulacji procesu szlifowania i topografii roboczej powierzchni ściernicy podejmowało wielu badaczy w różnych ośrodkach naukowych. W dotychczas proponowanych modelach nie dopracowano się jednak w pełni zadowalających rozwiązań. Opisy metod symulacji i zakres badanych obszarów procesu szlifowania zostały zestawione w tab.2.4. Najbardziej zaawansowanym modelem jest metoda symulacji procesu szlifowania i powierzchni roboczej ściernicy tworzonej w czasie rzeczywistym z uwzględnieniem procesu kształtowania oraz odnawiania i zużywania się ziaren ściernych, opracowana przez W. Kacalaka i pod Jego kierunkiem przez zespół badaczy (rys.2.23 – rys.2.28).

W podsumowaniu analizy literatury Autor rozprawy stwierdza między innymi, że w odniesieniu do procesów mikroskrawania:

- *„...zmienna długość strefy mikroskrawania jest ściśle powiązana z wartością zagłębienia ziaren na drodze skrawania, a tym samym zmienną ich aktywnością. W literaturze brak jest metody oceny aktywności ziaren, dających jednoznaczne wyniki...*
- *brak jest spójnych modeli cząstkowych procesu szlifowania...;*
- *niemożliwe jest porównywanie wyników pochodzących z różnych badań symulacyjnych, jak również nie daje to możliwości stosowania tych systemów do analizy i prognozowania wyników procesu oraz projektowania nowych narzędzi ściernych”.*

Oceniając tę część rozprawy doktorskiej stwierdzam, że w odniesieniu do zaproponowanego tematu analiza literatury została przeprowadzona w sposób zwięzły, przejrzysty i na poziomie potwierdzającym bardzo dobre przygotowanie mgr. inż. Łukasza Rypina do podjęcia tego złożonego problemu naukowego.

Rozdział 3 zawiera sformułowane cele pracy i problemy do rozwiązania. *Głównym celem jest wyznaczenie wpływu kinematyki i parametrów geometrycznych kontaktu pojedynczego ziarna ściernego na wielkość wyływek oraz wartości odkształceń i naprężeń w strefie pracy ziarna.* Materiałem reprezentującym stopy tytanu został wybrany stop Ti6Al4V.

Zostały sformułowane cztery cele cząstkowe (s.46) oraz dwie hipotezy pracy (s.47 i s.48). Sformułowane cele oraz hipotezy były podstawą do określenia problemów naukowych, które wymagają rozwiązania. Problemy te obejmują:

- definiowanie cech stereometrycznych naroży ziaren ściernych (rys.3.2);
- wyznaczanie i ocena przydatności wskaźników zdolności ziaren ściernych do usuwania materiału obrabianego (rys.3.3);
- dobór cech modeli dla różnych materiałów obrabianych (rys.3.4);

- wpływ cech materiału na zmienność naprężeń i odkształceń w procesie mikroskrawania (rys.3.5);
- cechy mikroskrawania agregatami ziaren (rys.3.6).

Zaproponowany zakres pracy, poszerzony o weryfikację eksperymentalną i numeryczną (s.53) odpowiada sformułowanym problemom badawczym.

Rozdziały 4 – 6 (s.54 – s.190) obejmują twórcze, autorskie rozwiązania zagadnień będących tematem rozprawy doktorskiej.

Rozdział 4 (s.54 – s.121) dotyczy modelowania procesów mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym. Głównym celem badań symulacyjnych procesu mikroskrawania pojedynczymi ziarnami ściernymi o zmiennej geometrii było określenie wpływu cech geometrycznych naroża ziarna ściernego na mikro- i makronieciągłości procesu dekohezji stopu tytanu Ti6Al4V, tworzenia wiórów i wyływek. Analizie zostały poddane: proces formowania wiórów, bocznych przemieszczeń materiału, trójosiowych odkształceń plastycznych materiału oraz trójosiowych naprężeń normalnych materiału.

Doktorant opracował odpowiednią metodykę badań i określił cel symulacji. Przedstawił model fizyczny, określający rozkład energii w procesie mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym, model matematyczny – równanie konstytutywne (równania 4.2 – 4.12) oraz model komputerowy opracowany w systemie ANSYS. Wyniki zostały obszernie udokumentowane (rys.4.1 – rys.4.61).

Przeprowadzone badania symulacyjne i ich analiza dostarczyły istotnych, nowych informacji o przebiegu procesu mikroskrawania stopu Ti6Al4V. Doktorant między innymi wykazał, że:

- wpływ na zmienność warunków procesu formowania bocznych wyływek oraz mikrowiórów ma nieregularna stereometria mikroziarna ściernego;
- o niekorzystnym zjawisku występowania wyływek na bokach rowka tworzonego narożem ziarna ściernego decyduje relacja pomiędzy oporem bocznym przepływu materiału, a oporem przemieszczania materiału wzdłuż powierzchni natarcia ostrza;
- w mikroskrawaniu występują boczne, względem toru ziarna, przepływy materiału;
- występują cykliczne zmiany w procesie oddzielania materiału – mikropoślizgi, które są przyczyną płytkowej budowy mikrowiórów;
- amplituda zmiany naprężeń w obrabianym materiale jest większa dla materiałów o małej plastyczności i dużej wytrzymałości;
- jednym ze sposobów zmniejszenia niekorzystnych, bocznych przepływów materiału jest zwiększenie szerokości warstwy skrawanej;
- decydujący wpływ na sposób formowania wiórów oraz wyływek obrabianego stopu tytanu Ti6Al4V mają cechy mikronaroży ziaren ściernych (por. rys.3.1).

Poprawność opracowanej przez Doktoranta procedury symulacyjnej w systemie ANSYS i uzyskanych wyników zostały zweryfikowane na przykładzie badań eksperymentalnych procesu mikroskrawania pojedynczym ziarnem ściernym – **rozdział 5** (s.122 – s.172.) Zakres tych badań obejmował:

- badania cech stereometrycznych mikronaroży ziaren ściernych o określonej charakterystyce;
- rejestrację procesu mikroskrawania stopu tytanu (prędkość skrawania $v_s = 10$ m/s, powiększenie optyczne 50x);
- rejestrację obrazów mikroskopowych oraz pomiary śladów mikroskrawania i wiórów;

- rejestrację profili śladów mikroskrawania oraz pomiary głębokości skrawania i powierzchni przekroju poprzecznego rysy.

Stanowiska badawcze zostały w pracy opisane, a wyniki badań obszernie udokumentowane (rys.5.1 – rys.5.58.) Na podstawie tych badań i analizy wyników Autor rozprawy stwierdził, że:

- decydujący wpływ na sposób formowania wiórów oraz wpływ obrabianego stopu Ti6Al4V mają cechy mikronaroży ziaren ściernych (por. rys.3.1);
- nieciągłość procesu mikroskrawania objawia się płytkową budową mikrowiórów;
- nieciągłością procesu mikroskrawania jest cykliczna zmiana głębokości usuwanego materiału (dna rysy), wynikająca z oddzielania mikroplytek;
- potwierdzona została poprawność doboru materiałowego modelu konstytutywnego, a to z kolei potwierdza trafność zastosowanej procedury symulacyjnej procesu mikroskrawania.

W rozdziale 6 (s.173 – s.190) Doktorant zawarł wyniki badań zrealizowane w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej w Politechnice Koszalińskiej, w ramach projektu finansowanego przez NCBiR, które potwierdzają możliwości przemysłowych zastosowań techniki mikroszlifowania materiałów trudnoskrawalnych. Stanowiska badawcze, układy pomiarowe i plan badań zostały jednoznacznie przedstawione w pracy (s.173 – s.176, tab.6.1 – tab.6.2 oraz rys.6.1.) Wyniki zostały udokumentowane na rys.6.2 – rys.6.17. Główne wnioski (s.186 – s.187) z badań z zastosowaniem ściernic z mikroagregatami stanowią podstawę do racjonalnego doboru warunków szlifowania stopów tytanu Ti6Al4V, uzyskując w efekcie:

- ograniczenie lub wyeliminowanie tworzenia zalepień na czynnej powierzchni ściernicy;
- stabilizację przebiegu procesu szlifowania w wyniku zmniejszenia różnic wartości chwilowych siły szlifowania;
- obniżenie przyrostu siły szlifowania wraz z upływem czasu obróbki, a dzięki temu wzrost trwałości ściernic;
- obniżenie wartości naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej;
- przy zastosowaniu 30% udziału mikroagregatów w strukturze ściernicy, poprawę jakości technologicznej obrobionej powierzchni.

Merytoryczną część rozprawy doktorskiej kończą wnioski - **rozdział 7**, których istotą jest potwierdzenie, że **„dzięki opracowanemu modelowi procesu mikroskrawania możliwe było poznanie zjawisk, które są niemożliwe do zaobserwowania w badaniach eksperymentalnych”**.

Na uwagę zasługują **wnioski dotyczące wykorzystania wyników badań w praktyce przemysłowej**, bowiem:

- na ich podstawie można zwiększyć efektywność usuwania obrabianego materiału i zmniejszyć objętość wpyłu poprzez zapewnienie korzystnej orientacji ziaren ściernych względem kierunku mikroskrawania;
- opracowana metodyka symulacji procesu szlifowania w systemie ANSYS może być zastosowana do projektowania i optymalizacji struktury narzędzi ściernych.

Doktorant wskazuje także **kierunki rozwoju badań** zmierzających do rozbudowy opracowanego modelu w zakresie:

- analizy pracy mikroagregatów ściernych;
- modelowania strefy kontaktu dużego zbioru naroży ściernych na powierzchni ściernicy

- uwzględnienia drgań układu technologicznego oraz odkształceń ziaren i lokalnych odkształceń narzędzia;
- modelowania procesów dla nowych odmian kinematycznych obróbki.

To skrótowe (wręcz pobieżne), syntetyczne przedstawienie przeze mnie zakresu opracowań mgr. inż. Łukasza Rypiny upoważnia do wyrażenia opinii, że zastosowane metody i procedury badawcze oraz uzyskane efekty świadczą o szerokiej i dogłębnej wiedzy, a także umiejętności analizy oraz syntezy złożonych problemów naukowych, nakierowanych również na ich przemysłowe zastosowania. Całość rozprawy doktorskiej została opracowana na bardzo dobrym poziomie.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej procedury rozwiązywania zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam w pełni pozytywnie**, albowiem zawiera ona zwięzłą, merytoryczną analizę stanu wiedzy z zakresu procesów mikroskrawania oraz propozycję własnej koncepcji wraz z oprogramowaniem do rozwiązania postawionego problemu badawczego. Przedstawione szczegółowe rozwiązania techniką symulacyjną i ich pozytywna weryfikacja potwierdzają poprawność przyjętych modeli oraz uzyskanych rozwiązań.

O wysokim poziomie przygotowania Autora rozprawy do prowadzenia prac badawczych świadczą: rzeczowa, merytoryczna analiza i synteza literatury, wykorzystanie wiedzy z zakresu planowania i organizacji badań, zastosowanie zaawansowanej wiedzy oraz umiejętności z zakresu technologii informacyjnych, a także pozytywna weryfikacja opracowanych programów symulacyjnych na realnych przykładach procesu szlifowania stopów tytanu.

Za oryginalny i ważny pod względem naukowym oraz użytecznym wkład Doktoranta w rozwiązanie przedstawionych problemów badawczych uznaję wykazanie, że:

- istotny wpływ na zmienność warunków procesu formowania bocznych wypływek oraz mikrowiórów ma nieregularna stereometria mikroziarna ściernego i zróżnicowanie cech geometrycznych poszczególnych fragmentów naroży;
- relacja między oporem bocznym przepływu materiału a oporem przemieszczania materiału wzdłuż powierzchni natarcia decyduje o występowaniu wypływek na bokach tworzonego rowka;
- cykliczne zmiany o częstotliwości 0,4 – 0,6 MHz w procesie oddzielania materiału w postaci mikropoślizgów przyczyniają się do płytkowej budowy mikrowiórów, co zostało także potwierdzone w próbach skrawania;
- nieciągłość procesu mikroskrawania wywołuje cykliczną zmianę zagłębiania ostrza przejawiającą się w postaci zmiennej głębokości śladu skrawania;
- amplituda zmiany naprężeń jest większa dla materiałów o małej plastyczności i dużej wytrzymałości;
- dobrany model konstytutywny i opracowany program symulacyjny dają wyniki zgodne z wynikami eksperymentu fizycznego.

Podsumowując stwierdzam, że zadania badawcze, które podjął Doktorant w znacznym uzupełniają wiedzę z zakresu mikroskrawania stopów tytanu. Rozprawę doktorską mgra inż. Łukasza Rypiny w całej rozciągłości oceniam pozytywnie. Opracowanie edytorskie pracy jest na bardzo dobrym poziomie.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z opracowaniem fizykalnych podstaw procesu mikroskrawania materiałów trudnoskrawalnych.

Mgr inż. Łukasz Rypina opanował na wymaganym poziomie współczesne metody organizacji badań i właściwe dla nich narzędzia, w tym narzędzia informatyczne, służące do rozwiązywania złożonych, wielowariantowych problemów badawczych.

Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie „budowa i eksploatacja maszyn” posiada oryginalne cechy nowości i istotne walory użytkowe. **Biorąc pod uwagę uzyskane efekty i wysoki poziom opracowania rozprawy wnioskuję o jej wyróżnienie.** Na podstawie przedstawionej analizy stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Rypiny nt.: „**Analiza i modelowanie procesów mikroskrawania stopów tytanu**” **spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednoczony z dnia 29 września 2014 r. wraz z późniejszymi rozporządzeniami) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

Kraków, dnia 27 maja 2016 r.

