

WPŁYNEŁO DNIA	
.....06.08.2022.....	
Kierownik administracyjny	
nr pisma	wydziału
podpis	

Dr hab. inż. Piotr NIEŚLONY, profesor uczelni
Katedra Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole
tel: +48 77 449 8460
e-mail: p.nieslony@po.edu.pl

Opole, 25.08.2022r.
mgr Kacpila Czerniak

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Marka MADAJEWSKIEGO pt.

„Modelowanie mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 6 lipca 2022 roku (DIM.075.344.2022).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Opracowywanie małych elementów maszyn lub szerzej ujmując miniaturyzacja systemów mechanicznych jest zakorzenionym już od wielu lat trendem w projektowaniu, budowie i wytwarzaniu części maszyn. Trend ten wynika z szeregu przyczyn, z których wymienić można między innymi znaczący rozwój w inżynierii biomedycznej, lotnictwie, kosmonautyce, przemyśle zbrojeniowego oraz inżynierii mikroukładów elektromechanicznych czy optycznych. Mimo różnych, nowych rozwiązań produkcyjnych, związanych z technologiami wytwarzania zminiaturyzowanych systemów mechanicznych, nadal mikrotechnologie użytkowe, w tym w szczególności mikroobróbka skrawaniem, są głównym elementem większości procesów technologicznych stosowanych w różnych obszarach przemysłu wytwórczego. Przejście z klasycznego procesu skrawania do skali mikrometrycznej stało się dużym wyzwaniem technologicznym, bo zjawiska występujące w skali mikrometrycznej oddziałują w sposób nieproporcjonalny na znaną nam mechanikę procesu skrawania. Prawidłowe prowadzenie procesu mikroskrawania wymaga spełnienia warunków zainicjowania dekohezji materiału. Niestety, wraz z malejącą grubością warstwy skrawanej proces formowania wióra zdominowany jest przez zjawisko bruzdowania, występowanie intensywnych zjawisk nagniatania powierzchni obrobionej, a tym samym umocnienia warstwy wierzchniej.

Wiadomo, że zjawiska związane z bruzdowaniem materiału wpływają negatywnie na efekty fizyczne i technologiczne procesu, a tym samym poznanie warunków właściwej realizacji procesu mikroskrawania staje się istotnym wymogiem prawidłowego kształtowania powierzchni elementów układów mikromechanicznych.

Badania tak trudnego obszaru mikromechaniki nie są łatwe, głównie ze względu na konieczność przystosowania układów pomiarowych do warunków technicznych zdeterminowanych przez efekt skali. Z tego też powodu większość naukowców badania doświadczalne czy modelowanie analityczne próbuje uzupełnić lub ściślej mówiąc dopełnić przy użyciu technik symulacji numerycznych. Takie podejście do przygotowania danych dla potrzeb modelowania mechaniki procesu mikroskrawania wydaje się ze wszelkich miar uzasadnione i racjonalne. Z tego też względu zaproponowany przez Doktoranta sposób modelowania mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych, z walidacją efektów prac numerycznych z danymi eksperymentalnymi, jest jak najbardziej prawidłowy i wpisuje się w metodologię prowadzenia tego typu badań naukowych promowaną przez szereg naukowców z wiodących ośrodków badawczych.

Mimo spodziewanych problemów Pan mgr. inż. Marek Madajewski podjęła się wyzwania modelowania mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych, a efektem jego pracy jest przedłożona do recenzji rozprawa doktorska.

W przygotowanym bardzo szczegółowo i adekwatnie do tematu pracy przeglądzie literatury przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat numerycznych metod symulacji procesu skrawania jak i mikroskrawania. Rozwinięto temat różnych metod symulacji numerycznych i ich przydatności do symulacji w warunkach mikroskrawania, jak również metod identyfikacji minimalnej grubości warstwy skrawanej z uwzględnieniem efektu ciągłości procesu polegającego na skrawaniu następujących po sobie, kolejnych warstw materiału obrabianego (skrawanie konsekwentne).

Zakres zaproponowanych i przeprowadzonych w ocenianej dysertacji prac eksperymentalnych, numerycznych oraz analityczno-numerycznych jest jak najbardziej uzasadniony, ponieważ:

- Efektywna miniaturyzacja systemów mechanicznych jest konsekwentnie rozwijanym trendem w rozwoju urządzeń technicznych, a jedną z możliwości osiągnięcia tego celu jest poznanie mechaniki procesów związanych z kształtowaniem tego typu elementów, w tym właśnie procesów mikroskrawania.
- Ze względu na skalę badanego zjawiska, gdzie z dobrze już poznanej przestrzeni makro przechodzi się na obszar mikro i nano, wykorzystanie technik symulacji numerycznych jako uzupełniającego, ale jednak równorzędnego narzędzia badawczego, jest jak najbardziej uzasadnione i poprawne.
- Dobranie i zweryfikowanie racjonalnych metod symulacji numerycznych, pozwalających na uzyskanie oczekiwanych rezultatów dla procesów obróbkowych prowadzonych w skali mikro, ma istotne znaczenie naukowe jak i praktyczne oraz może mieć duży wpływ na dalszy rozwój technologii wytwarzania zminiaturyzowanych części mechanicznych.

W tym kontekście uważam, że wybór tematyki rozprawy dotyczącej modelowania mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych jest trafny i uzasadniony.

2. Zawartość pracy

Rozprawa jest edycyjnie bardzo dobrze napisana. Dysertacja jest bardzo obszerna, ma w sumie 185 stron. Wyszczególniono w niej 9 rozdziałów. Rozdziały są czytelnie, logicznie ułożone, a większość z nich zawiera szereg dobrze zdefiniowanych podrozdziałów.

Praca jest dobrze zilustrowana, zawiera 122 rysunki oraz 14 tabel. Przegląd literatury jest bardzo obszerny i ujmuje 220, z reguły dobrze dobranych i cytowanych w pracy, pozycji. Ważnym podkreślenia jest fakt przygotowania przeglądu literatury w oparciu o nowe, aktualne publikacje głównie z lat 2000 – 2020, jak również parę starszych z lat 1960 – 1961 oraz 1990-97. To potwierdza dobre przygotowanie merytoryczne doktoranta, który teoretyczne podstawy modelowania MES jak i mechaniki procesu mikroskrawania przedstawił i omówił na pierwszych, bazowych publikacjach właśnie z lat 1960-61.

Dysertacja rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz czytelnym wykazem ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy.

Pierwszy rozdział pracy to wprowadzenie do tematyki dysertacji, gdzie omówiono podstawowe zagadnienia odnośnie miniaturyzacji systemów mechatronicznych, przedstawiono definicję mikrotechnologii, problemów z bruzdowaniem oraz metod numerycznych stosowanych w procesach obróbki ubytkowej.

Szeroko ujęte studium literatury opisano w rozdziale drugim. Przedstawione informacje dotyczą aktualnego stanu wiedzy z wyraźnym ukierunkowaniem na informacje, które zostaną wykorzystane w dysertacji podczas prezentowania założeń, co do planu badawczego i zakresów realizacji pracy badawczej. Studium jest bardzo obszerne, podzielone na siedem logicznie wyodrębnianych podrozdziałów. Przedstawione w nim informacje merytoryczne są dobrze opisane i układają się w spójny ciąg. Zakończeniem rozdziału jest czytelne i ciekawie przedstawione, w formie tabelarycznej, podsumowanie literaturowe. Takie rozwiązanie poprawia przejrzystość zebranych informacji i potwierdza merytoryczną wiedzę Doktoranta, który potrafił z ogromu danych wyfiltrować najważniejsze zalety i wady metod i wariantów modelowania MES.

Trzeci rozdział pracy to cel i hipoteza pracy. Ustalono cztery podstawowe cele pracy i dwie hipotezy. Wszystko w sposób bardzo klarowny i jednoznaczny. W celu udowodnienia zaproponowanych hipotez poprawnie zdefiniowano szereg szczegółowych badań, z podziałem na badania wstępne jak i zasadnicze. W tym jedynie przypadku można się zastanowić, czy pierwsze zdefiniowane badanie wstępne opisane jako „sformułowanie założeń modelu ze sprzężonym sformułowaniem Eulera-Lagrange’a realizowanego przez MES” nie jest raczej ustaleniem założeń wejściowych do modelowania, a nie klasycznym badaniem, w który realizuje się czynności mających przynieść konkretne rozwiązania.

W rozdziale czwartym przedstawiono sposób realizacji i przygotowania torów pomiarowych dla potrzeb przeprowadzenia eksperymentalnych badań doświadczalnych.

Problemem konstytuowania modeli MES ukierunkowanych na poprawną symulację mikroskrawania Autor dysertacji zajął się w rozdziale piątym. W rozdziale tym przedstawiono zarówno podejście do

wyznaczania stałych termomechanicznych modeli MES jak i zwrócono uwagę na różnice w danych wejściowych dla potrzeb modelowania CEL i ALE.

Szósty rozdział przedstawia podejście do analitycznego modelowania procesu mikroskrawania. W tym zakresie Autor ukierunkowywał opis tej problematyki na proces mikrofrezowania, tym samym nawiązując do celu i zakresu swoich badań.

Jednym z obszerniejszych rozdziałów pracy jest rozdział siódmy w którym przedstawiono badania własne i ich analizę. Zgodnie z celem projektu rozdział podzielono na badania wstępne i zasadnicze, a cały cykl badań numerycznych miał przedstawić szereg problemów związanych z modelowaniem MES mikroskrawania (wpływ gęstości siatki, czas obliczeń, efekty stosowania sprzężonego modelu Eulera-Lagrange'a typu CEL, predykcja minimalnej grubości warstwy skrawanej).

Wnioski poznawcze, użytkarckie oraz wnioski do dalszych badań Doktorant przedstawił w rozdziale ósmym. Rozdział dziewiąty to spis literatury.

3. Uwagi szczegółowe dotyczące pracy

1. W ramach przeglądu literatury Autor wielokrotnie przedstawia ciekawe zdjęcia efektów symulacji MES z prac różnych autorów. Są one oczywiście dobrze cytowane, jednak wydaje się, że w celu ułatwienia interpretacji tych danych dobrze byłoby już w opisie rysunku podać nazwę oprogramowania z którego dany autor korzystał oraz technikę MES, którą zastosował do obliczeń (przykładowo rys.2.41, 2.42).
2. Na rys. 5.1 przedstawiono, oszacowane modelem J-C, wartości naprężenia w funkcji odkształcenia zastępczego dla wybranych wartości temperatury oraz prędkości odkształcenia. Brakuje jednak informacji dla jakich parametrów modelu J-C wykonano te obliczenia? Czy są to te same dane jakie przedstawiono w Tabeli 5.1?
3. Nawiązując do problematyki parametrów modeli konstytutywnych. Autor swojej pracy prowadził testy dla stali C45. Odpowiednie parametry modelu J-C dobrał bazując na danych literaturowych (Tabela 5.1). Czy były one jednak w jakikolwiek sposób weryfikowane w ujęciu materiału, który skrawano podczas testów eksperymentalnych? Podobne pytanie nasuwa się donośnie właściwości termomechanicznych dla tej stali oraz materiału narzędzia (Tabela 5.2). W jakim stanie twardości był ten materiał obrabiany?
4. Bardzo ciekawe analizy przeprowadził Autor dysertacji w ujęciu wpływu liczby elementów w modelu numerycznym N_E na wartości badanych wielkości fizycznych. Odnośnie maksymalnych naprężeń Misesa uzyskano pewną stabilizację wyników symulacji w funkcji N_E . pozwoliło to wyznaczyć optymalną wydaje się gęstość siatki. Jednak dla przypadku temperatury skrawania Autor sugerował, że „Przebieg temperatury maksymalnej ϑ_{max} w funkcji N_E nie pozwala stwierdzić występowania zbieżności dla tej zmiennej w symulacjach testowych, gdyż temperatura zmienia się w sposób losowy osiągając wartości od 487,9 K do 490,9 K, a wartość średnia dla całego zakresu wynosi $\vartheta_{max_sr} = 489,5$ K”. Dlaczego sformułowano taki wniosek? Patrząc na skalę wartości maksymalnej przedział zmian

temperatury odnoszony do wartości średniej osiąga procentowo jedynie poziom 0,61%. Wydaje się w tym przypadku, że można przyjąć, iż wrażliwość modelu CEL MES na zmiany temperatury w funkcji N_E jest pomijana.

5. Proszę podać, dlaczego Autor badając wpływ gęstości siatki posługiwał się raz całkowitą liczbą elementów w modelu N_E , a innym razem wartością podziałki głównej? Zgodnie z tabelą 7.1. są to dane zależne, jednak takie zamienne ich stosowanie utrudnia analizę problemu.
6. Czy Autor zastanawiał się, dlaczego czas obliczeniowy dla różnych wartości głębokości skrawania lub zmiennej grubości warstwy skrawanej (rys.7.10) zmienia się w sposób mało liniowy? Jak to zinterpretować?
7. Porównując jakość modelowania za pomocą modeli ALE i CEL Autor weryfikował między innymi jakość odwzorowania geometrii mikro-wióra (rys.7.11). W opisie na str. 122 podano, że „w analizie modelem CEL dla drogi skrawania $L_s = 40 \mu\text{m}$ proces formowania wióra wciąż postępuje stabilnie i uzyskuje się realistyczny wiór o wygładzonym zarysie powierzchni swobodnych”. Na jakiej podstawie przyjęto, że jest to wiór realistyczny? Czy może wykonano badania eksperymentalne, gdzie takie wióry oceniano? Podobnie oceniano geometrię bruzdy w modelowaniu MES (rys.7.12). Zauważono istotne rozbieżności, jednak który kształt bruzd jest zgodny z rzeczywistością? Czy udało się to zweryfikować eksperymentalnie?
8. Wykonując wielokrotnie graficzne analizy porównawcze (przykładowo rys.7.18) wydaje się, że Autor zachowuje te same skale wymiarowe, jednak na pewno nie zapewniono tych samych wartości dla skali barw prezentujących badane wartości fizyczne. To utrudnia szybką analizę problemu.
9. W pracy przedstawiono wiele ciekawych wniosków w ujęciu poznawczym, użytecznym oraz ze wskazaniem kierunku dalszych planowanych badań. Wiele z nich przedstawia zalety modelowania w formule CEL i możliwości zastosowanie tego rozwiązania do bardziej zaawansowanych przypadków mikroskrawania. Czy Autor zastanawiał się nad praktycznym wykorzystaniem pozyskanej wiedzy o minimalnej grubości warstwy skrawanej? Jakiego rodzaju rady mógłby Autor przekazać inżynierom zajmującym się kształtowaniem, a dokładniej obróbką frezowaniem elementów maszyn w skali mikro? Jak dobierać parametry technologiczne, narzędzia i ich stereometrię albo na co zwrócić uwagę przy ustalaniu technologii obróbki dla tego typu procesów?

4. Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest bardzo starannie napisana. Drobne błędy stylistyczne i edycyjne nie wpłynęły na jakość pracy.

Rozdziały redagowane są bardzo czytelnie, zarówno pod względem stylistycznym jak i edycyjnym. W pracy zachowano jednolity i dobrze przemyślany układ graficzny, co ułatwia jej zrozumienie. Czytając poszczególne rozdziały widoczna była szczególna staranność w zakresie estetyki informacji graficznych (rysunków, wykresów itd.). Uważam, że praca, pod względem redakcyjnym, jest napisana

na bardzo wysokim poziomie i może być stawiana za przykład prac doktorskich w obszarze inżynierii mechanicznej.

5. Ocena końcowa

Powyższe uwagi krytyczne nie podważają istotnej treści merytorycznej rozprawy ani nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, który udowodnił, że posiada dużą wiedzę z zakresu obróbki skrawaniem, a w szczególności z problemów wynikających z kształtowania elementów maszyn w skali mikro. Dodatkowo Doktorant wykazała się znacznymi umiejętnościami z zakresu planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych jak i symulacyjnych. Udowodnił w swojej dysertacji, że potrafi opracować i przygotować wyniki badań zgodnie z najlepszymi wzorcami pracy naukowej, posługując się odpowiednimi analizami matematycznymi i dobrym statystycznym opracowaniem wyników, co pozwoliło mu przeprowadzić bardzo szczegółową i jednoznaczną analizę tak otrzymanych danych.

Uważam, że uwagi zawarte w recenzji mogą być przedmiotem analiz w dalszej działalności badawczej i publikacyjnej Pana mgr inż. Marka Madajewskiego. Szczególnie duże znaczenie może mieć to w kontekście opracowania technologii kształtowania mikroelementów maszyn w procesach mikroskrawania. Podkreślam, że część uwag ma charakter pytań i sugestii do wykorzystania na przyszłość. Ponadto stwierdzam, że postawione w pracy cele naukowo-badawcze jak i użyteczne zostały osiągnięte.

Reasumując, wśród wielu nowych zagadnień spotykanych w nowoczesnej obróbce skrawaniem Pan mgr inż. Marek Madajewski potrafił znaleźć istotny, z punktu widzenia naukowego i użytecznego, obszar badawczy, w ramach którego możliwe stało się zbadanie wybranego obszaru mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych. Wynikiem pracy Doktoranta jest niniejsza dysertacja, której efekty niewątpliwie przyczyniły się do rozwoju inżynierii mechanicznej.

Uważam również, że ze względu na umiejętność kompleksowego podejścia do badań mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych, z bardzo szczegółowym przedstawieniem wiedzy i rozwiązań światowych z zakresu tej tematyki, kompleksową analizą metod numerycznych adekwatnych do zastosowań w ramach obszaru mikroobróbki, przygotowaniem hybrydowego analityczno-numerycznego modelu składowych siły całkowitej dla mikrofrezowania o dobrej zgodności z ekskrementem oraz dobrym przybliżeniem koncepcji symulacyjnych badań zjawisk fizyczno-mechanicznych towarzyszących procesowi mikroskrawania, **pracę tę można uznać za wyróżniającą**. Należy również wskazać, że Doktorant aktywnie uczestniczy w publikacyjnej pracy naukowej prezentując swoje osiągnięcia w czasopismach polskich jak i zagranicznych. Do ważniejszych osiągnięć należy zaliczyć artykuły w *International Journal of Machine Tools and Manufacture* oraz *Archives of Mechanical Technology and Materials*.

Niepodważalne zalety pracy to:

1. Ocena i wyselekcjonowanie optymalnych, z punktu widzenia technologii mikroskrawania, modeli numerycznych pozwalających na uzyskanie racjonalnych wyników symulacji z akceptowalnym kosztem obliczeniowym.
2. Uwzględnienie w modelowaniu MES problemu pamięci technologicznej poprzez zastosowanie modelu mikroskrawania z konsekwentnym przejściem dwóch ostrzy.

3. Zdefiniowanie użytecznych wniosków o dużym znaczeniu aplikacyjnym dla naukowców zajmujących się modelowaniem MES w obszarze mikroobróbki.

6. Wniosek końcowy

Całość rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Marka MADAJEWSKIEGO pt. „Modelowanie mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zarówno w aspekcie technologicznym jak i praktycznym, a przedstawione w dysertacji rozwiązanie problemu naukowego potwierdza wiedzę Doktoranta z inżynierii mechanicznej i wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa doktorska opatrzone jest odpowiednim streszczeniem w języku angielskim. Wypełnienie tych wymogów umożliwia sformułowanie wniosku o spełnieniu warunków określonych ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz.U. z 2016r. poz.882). W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej o **przyjęcie tej rozprawy i o dopuszczenie Autora**, Pana mgr inż. Marka MADAJEWSKIEGO, do publicznej obrony w ramach **dyscypliny inżynieria mechaniczna**.

