

Prof. dr hab. inż. Józef Gawlik
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii i Automatyki Produkcji



RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Madajewskiego nt.: „**Modelowanie mechaniki procesu mikroskrawania przy zastosowaniu metod numerycznych**”

Promotor: dr hab. inż. Szymon Wojciechowski, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Matuszak

Podstawa opracowania: pismo nr DIM.075.344.2022, z dnia 06.07. 2022 r.

Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej

dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 185 stron numerowanych, a w tym: 2 str. spisu treści; 2 str. streszczeń w j. polskim i w j. angielskim; 2 str. wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów; 6 str. spisu rysunków; 3 str. spisu tabel; 3 str. wprowadzenia; 13 str. wykazu bibliografii (220 pozycji). Praca składa się z 9 rozdziałów (rozdział 9 - literatura).

Rozprawa doktorska została opracowana bardzo starannie pod względem redakcyjnym i edycyjnym.

We wprowadzeniu - rozdział 1 (s.7 - s.8) Autor rozprawy przedstawił w skrócie charakterystykę pracy podkreślając dynamiczny rozwój technologii mikroskrawania w produkcji części w inżynierii biomedycznej, lotnictwie, przemyśle zbrojeniowym, w inżynierii mikroukładów elektromechanicznych (MEMS), mikroukładów optycznych, w produkcji miniaturowych części o krzywoliniowych zarysach powierzchni, do wytwarzania oprzyrządowania i narzędzi do produkcji mikroform wtryskowych, mikromatryc i szeregu innych wyrobów.

Analizując wstępnie proces skrawania w skali mikrometrycznej Doktorant zwraca uwagę na specyficzne jego cechy, które w sposób istotny oddziałują na kinetykę i mechanikę zjawiska burzenia spójności (dekohezji) obrabianego materiału. Wymienia szereg specyficznych różnic technologii mikroskrawania, a między innymi:

- podczas mikroskrawania grubość warstwy skrawanej, czyli grubość usuwanego naddatku jest porównywalna do wielkości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej;
- efektywny kąt natarcia ostrza skrawającego jest ujemny, a proces formowania wióra zdominowany jest przez zjawisko bruzdowania w zakresie odkształceń sprężysto-plastycznych, lub też dekohezja materiału nie następuje;
- wraz z malejącą grubością warstwy skrawanej występuje tzw. efekt skali, charakteryzujący się nieliniowym wzrostem oporów właściwych skrawania i wzrost wydatku energii wymaganej do usunięcia materiału;
- obserwuje się intensywne zjawisko nagniatania powierzchni obrabianej przez zaokrągloną krawędź skrawającą ostrza, które indukuje znacznie większy efekt umocnienia warstwy wierzchniej, aniżeli w warunkach obróbki konwencjonalnej;
- graniczna grubość naddatku (minimalnej grubości warstwy skrawanej) wymagana do inicjacji procesu formowania wióra zależy od naprężenia poślizgu, temperatury, skrawalności materiału, na które efekt umocnienia materiału poprzez zgmiot wywiera bezpośredni wpływ;
- zjawiska związane z bruzdowaniem materiału wpływają negatywnie na fizyczne i technologiczne efekty procesu;

- widoczny jest wpływ bruzdowania na składowe całkowitej siły skrawania, stabilność procesu i wydajność obróbki;
- drgania układu OUPN oraz przemieszczenie części roboczej narzędzia w trakcie procesu mikroskrawania wpływają na pogorszenie jakości powierzchni oraz dokładności wymiarowo kształtowej obrabianej części.

Możliwość zastosowania technik symulacji numerycznych zapewnia unikatowy wgląd w analizowany proces skrawania pod warunkiem, że: „... model numeryczny procesu skrawania czy mikroskrawania musi w adekwatny sposób uwzględniać złożone nieliniowe oddziaływania na styku przedmiot obrabiany - ostrze w obliczu intensywnych i gwałtownych sprężysto-plastycznych odkształceń przedmiotu obrabianego, wywołanych dekohezją materiału”.

Biorąc pod uwagę znaczenie techniki mikroskrawania, podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaję w pełni za aktualny i ważny dla rozwoju wytwarzania szerokiego spektrum mikromaszyn i urządzeń technologicznych.

W rozdziale 2 - Aktualny stan zagadnienia (s.9 - s.69) Doktorant przedstawił gruntowną analizę dotychczasowych prac dotyczących:

- istoty procesu mikroskrawania;
- istoty modelowania numerycznego procesu mikroskrawania;
- charakterystyki numerycznego modelowania mikroskrawania na bazie metody SPH wygładzonej hydrodynamiki cząstek (SPH);
- charakterystyki numerycznego modelowania mikroskrawania na bazie metody dynamiki molekularnej (MD);
- charakterystyki numerycznego modelowania mikroskrawania na bazie metody elementów skończonych (MES).

Proces mikroskrawania jest integralną częścią techniki i technologii wytwarzania części mikromaszyn, których dwa wymiary są mniejsze niż 1000 μm . Do metod mikroobróbki zalicza się między innymi mikro- toczenie, frezowanie, wiercenie. Szczególną pozycję zajmuje proces mikrofrezowania, który zapewnia możliwość wytwarzania elementów 3D z różnych materiałów konstrukcyjnych, a w tym powierzchni o zarysie krzywoliniowym.

Zawężone są wymagania dotyczące odchyłek wymiarowo-kształtowych oraz jakości powierzchni, np. wymagane odchyłki płaskości i walcowości są poniżej 100 nm, chropowatość powierzchni jest w zakresie $Ra = 10 \div 100$ nm.

Statyczne i dynamiczne zjawiska towarzyszące procesowi mikroobróbki, jak drgania czy błędy geometryczne układu OUPN, intensyfikują się w skali mikro, gdyż nawet niewielkie przemieszczenie części roboczej narzędzia ma wpływ na stabilność procesu oraz efekty obróbki.

Mikrofrezy o małych średnicach części roboczej ($D \leq 1$ mm) wymagają zastosowania wrzecion zdolnych do pracy ciągłej w zakresie prędkości obrotowej do kilkuset tysięcy obrotów na minutę, aby osiągnąć umiarkowaną wydajność obróbki oraz wymaganą prędkość skrawania dla danego materiału obrabianego. Porównanie zakresu mikroskrawania oraz obróbki ultra-precyzyjnej zostało ujęte w tab.2.1.

Kolejna cecha procesu mikroskrawania dotyczy porównywalnej wartości promienia r_n zaokrąglenia krawędzi skrawającej z wartością posuwu na ostrze f_z , co oznacza, że ostrze praktycznie traci swoją „ostrość” względem grubości warstwy skrawanej. Dlatego w procesie mikroskrawania wyróżnia się parametr minimalnej grubości warstwy skrawanej h_{min} , po którego przekroczeniu następuje formowanie wióra (proces dekohezji).

Z uwagi na zjawisko powrotu sprężystego materiału oraz parametr h_{min} , w zależności od grubości warstwy skrawanej proces mikroskrawania może zostać podzielony na trzy zakresy: oddziaływania sprężystego bruzdowania oraz skrawania (ilustracja graficzna - rys. 2.4 - rys.2.5).

Następny zakres analizy dotyczy wybranych metod modelowania numerycznego procesu skrawania. W strefie obróbki oddziałuje wzajemnie wiele zjawisk decydujących o termodynamice procesu mikroskrawania.

W modelach analitycznych zakłada się występowanie wielu uproszczeń dotyczących np.: kształtu wióra, równomiernego działania źródeł ciepła w strefie skrawania, nieciągłości w rozkładzie prędkości płynięcia materiału liniowego, czy kształtu płaszczyzny poślizgu.

W tym kontekście metody numerycznych symulacji w analizie procesu skrawania i mikroskrawania mają szereg zalet w porównaniu do metod analitycznych, bowiem w świetle analizy Doktoranta:

- „*umożliwiają wyznaczenie wartości i rozkładu trudno mierzalnych zmiennych, jak składowe siły całkowitej, naprężenia, odkształcenia, prędkość odkształceń, temperatura, naprężeń kontaktowych czy prędkości płynięcia materiału,*
- *umożliwiają predykcję nieliniowego zarysu powierzchni swobodnych formowanego wióra, którego oddziaływanie na rozkład zmiennych pola jest uwzględnione w analizie,*
- *umożliwiają zastosowanie złożonych modeli konstytutywnych uwzględniających między innymi wpływ odkształceń, prędkości odkształceń oraz temperatury,*
- *oddziaływanie wióra z przedmiotem obrabianym może zostać opisane modelem tarcia uwzględniającym warunki strefy poślizgu i przylegania”.*

Słusznie też Doktorant zwraca uwagę, że: „*... pomiary doświadczalne oraz modele analityczne procesu skrawania stanowią podstawowe narzędzia w sformułowaniu wiedzy na temat mechaniki procesu skrawania, zaś metody numerycznych symulacji zapewniają unikatowy wgląd w analizowany proces”.*

Niezbędna zatem jest liczna grupa parametrów, które bezpośrednio wpływają na wynik symulacji, przy czym parametry modelu niejednokrotnie są uwikłane we wzajemne zależności. Mgr inż. M. Madajewski zaprezentował w rozprawie doktorskiej szczegółową analizę publikacji nt. poszczególnych metod modelowania numerycznego procesu mikroskrawania, wzbogacając ją o własny komentarz.

Również za bardzo dobrą uznaję analizę **metod identyfikacji minimalnej grubości warstwy skrawanej** z ilustracjami wyjaśniającymi istotę problemu (rys.2.34 - rys.2.6) i z przedstawieniem odpowiednich zależności matematycznych. Zwięzłe podsumowanie przeglądu literatury, z podaniem zalet i wad poszczególnych metod, zostało zawarte w tab. 2.2, a także w podsumowaniu (s.67 - s.69).

Pomimo, że stan badań związanych z modelowaniem numerycznym procesu skrawania jest ciągle rozwijany i udoskonalany, Doktorant zidentyfikował pewne luki dotyczące:

- *„oceny skuteczności modelowania procesu mikroskrawania w warunkach bruzdowania i skrawania modelem MES ze sprzężonym sformułowaniem Eulera-Lagrange’a;*
- *predykcji wartości h_{min} na podstawie porównywalnych aspektów fizykalnych określonych doświadczalnie oraz symulacyjnie,*
- *jakościowej oraz ilościowej oceny wpływu efektu skrawania konsekwentnych (będących następstwem) warstw w symulacji MES na wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej oraz składowych siły całkowitej,*
- *porównania numerycznego modelu mikroskrawania konsekwentnych warstw z doświadczalnym procesem mikrofrezowania”.*

Stwierdzam, że opracowana przez mgr inż. Marka Madajewskiego analiza literatury została przedstawiona w sposób uporządkowany, merytoryczny i konsekwentny w odniesieniu do tematu rozprawy. Potwierdza to zatem Jego bardzo dobre przygotowanie do realizacji badań i pracy naukowej.

Rozdział 3 - Cel i główne hipotezy pracy (s.70 –s.72) zawiera 4 sformułowane cele pracy i 2 hipotezy nie budzące zastrzeżeń. Celami są:

1. *Opracowanie modelu metodą elementów skończonych stosującego sprzężone sformułowanie Eulera-Lagrange'a CEL, charakteryzującego wybrane zjawiska fizyczne w strefie styku narzędzie-przedmiot obrabiany dla dwóch konsekwentnych przejść ostrza w procesie mikroskrawania.*
2. *Przybliżenie minimalnej grubości warstwy skrawanej stosując metodę przyrostów siły stycznej do zaokrąglonej krawędzi skrawającej w oparciu o dane pozyskane z modelu CEL/MES pierwszego i drugiego przejścia ostrza oraz dane doświadczalne z mikrofrezowania.*
3. *Identyfikacja i analiza mechanizmów odpowiedzialnych za zmiany wartości składowych siły całkowitej, stanu naprężeń i h_{min} pomiędzy konsekwentnymi przejściami ostrzy.*
4. *Opracowanie hybrydowego modelu analityczno-numerycznego składowych siły całkowitej i jego weryfikacja w warunkach doświadczalnych, obejmujących próby mikrofrezowania.*

Hipotezy pracy:

- I. *Odkształcenia resztkowe powstałe w następstwie skrawania pierwszej warstwy materiału obrabianego w procesie mikroskrawania wywierają ilościowy i jakościowy wpływ na składowe siły całkowitej oraz wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej podczas obróbki drugiej warstwy.*
- II. *Wartości składowych siły całkowitej oraz minimalnej grubości warstwy skrawanej oszacowane na bazie opracowanych modeli CEL/MES oraz modelu analityczno-numerycznego, uwzględniających konsekwentne przejścia ostrzy wykazują większą zgodność z danymi doświadczalnymi w porównaniu do wartości oszacowanych na bazie modeli uwzględniających pojedyncze przejście ostrza.*

W rozdziale 4 - Opis badań doświadczalnych (s.72 - s.83) zostały zaprezentowane szczegółowe informacje dotyczące badań wstępnych i badań zasadniczych, podporządkowane sformułowanym celom pracy. Doktorant przedstawił dane odnoszące się do:

- zakresu i warunków badań doświadczalnych;
- stanowiska do prób mikrofrezowania i pomiaru składowych sił całkowitej;
- dynamicznej charakterystyki siłomierzy;
- pomiaru sztywności statycznej oraz bicia promieniowego mikrofrezu.

Obrabianym materiałem była stal 45 (AISI 1045), skład chemiczny - tab.4.1. Mikrofrezy 2-ostrzowe Kyocera o średnicy części roboczej 1 mm, wykonane z węgla spiekanego (skład chemiczny - tab.4.2) i pokryte powłoką (skład chemiczny - tab.4.3). Profil mikrogeometrii ostrza frezu oraz obraz 3D (pomiar na optycznym urządzeniu pomiarowym Alicona IF Edge Master) zostały przedstawione na rys.4.2, a w postaci zdigitalizowanej po analizie numerycznej na rys.4.3.

Plan badań doświadczalnych mikrofrezowania został uwidoczniiony w tab.4.4. Parametry stałe: głębokość skrawania $a_p = 20 \mu m$; szerokość skrawania $a_e = 1 mm$; prędkość obrotowa $n = 18000 obr/min$; prędkość skrawania $v_c = 57 m/min$; posuw na ostrze zmienny w zakresie $f_z = [0,1 \div 10,0 [\mu m/ostre]]$ stopniowany co $0,1 \mu m$ w zakresie od $0,1 \div 2,0 \mu m$, a powyżej $2,0 \mu m$: $4,0 \mu m$; $7,0 \mu m$; $10,0 \mu m$.

Główne zespoły stanowiska badawczego (rys.4.4 i rys.4.5) z wyposażeniem składały się z:

- mikrofrezarki SNTM-CM-ZUT-1 z wrzecionem o poziomej osi, z silnikiem SycoTec 4015DC z oprawką zaciskową C1-8 (zakres średnic części chwytowej $0,5 \div 4 mm$) zintegrowaną z wałem silnika;
- sterowanych numerycznie modułowych platform AeroTech napędzanych przez bezszczotkowe liniowe silniki serwo w trzech ortogonalnych kierunkach X, Y, Z;
- piezoelektrycznego siłomierza Kistler 9256C1 o zakresie pomiarowym do 250 N, na którym jest zamocowany przedmiot obrabiany;

- stacji PXIe-8133 firmy National Instruments z kartą pomiarową PXIe-4499 do rejestracji składowych siły całkowitej z maksymalną częstotliwością próbkowania 204,8 kHz.

Obróbka sygnału była dokonana w programie LabVIEW/DIADEM. Z zarejestrowanych przebiegów czasowych składowych siły całkowitej do analizy Doktorant wybrał fragmenty sygnału o długości 0,1 s pochodzące ze środkowej strefy frezowanego rowka.

Ważnym etapem przed podjęciem badań zasadniczych było **określenie dynamicznej charakterystyki siłomierza** z uwagi na niewielkie wartości sił składowych w relacji do czułości układu pomiarowego.

Do oceny podatności dynamicznej siłomierza Doktorant posłużył się testem impulsowym, przeprowadzonym za pomocą mikromłotka modalnego PCB 086E80. Test impulsowy był wykonany po zamocowaniu przedmiotu obrabianego do siłomierza, wzbudzając siłomierz w trzech kierunkach ortogonalnych X, Y, Z układu udniesienia (rys. 4.6). Siłomierz w każdym kierunku został uderzony młotkiem impulsowym 16 razy. Do pomiaru odpowiedzi siłomierza na wzbudzenia zastosowano system akwizycji danych LMS SCADAS III. W celu skompensowania dynamicznej podatności siłomierza i jej wpływu na pomiary składowej siły całkowitej Doktorant zastosował filtrację sygnału sił opartą na odwrotności funkcji przejścia dla poszczególnych kierunków pomiaru. Wyniki zarejestrowanych sygnałów zostały przedstawione na rys.4.7 - rys.4.10.

O wysokiej jakości siłomierza świadczy m. in. porównanie amplitudy składowej siły F_x oraz zarejestrowanej przez siłomierz podczas obróbki z sygnałem szumu jako tła. (rys.4.10).

Przed rozpoczęciem prób skrawania były wykonane pomiary **szttywności statycznej** oraz **bicia promieniowego ostrzy mikrofrezu** (stanowisko - rys.4.11 oraz rys.4.13)

Za pomocą napędu liniowego było zwiększane ugięcie zamocowanego narzędzia i przemieszczanie bloku oporowego stopniowo co krok o 1 μm trwający 0,2 s. Wraz z kolejnymi przemieszczeniami układu o 1 μm zarejestrowana wartość siły F_y gwałtownie wzrastała, a po krótkim postoju stabilizowała się (rys. 4.12). Dla przemieszczenia wynoszącego łącznie 10 μm zarejestrowano siłę $F_y = 2,73 \text{ N}$. Oszacowana na podstawie tych pomiarów sztywność statyczna zamocowanego mikrofrezu jest rzędu $k_s = 0,273 \text{ N}/\mu\text{m}$.

Uwaga: o dokładności (sztywności) zamocowania frezu decyduje rodzaj zastosowanej oprawki zaciskowej. Nie doszukałem się w tekście pracy informacji, jaka to była oprawka, z mocowaniem mechanicznym czy może termokurczliwa?

W rozdziale 5 - Konstytuowanie modeli MES mikroskrawania s.84 - s.97) mgr inż. M. Madajewski zawarł zasadnicze informacje dotyczące wybranych problemów modelowania procesu mikroskrawania. We wstępie wskazał na główny zakres działań, a mianowicie:

„W rozprawie do modelowania procesu mikroskrawania ortogonalnego metodą elementów skończonych posłużono się sprzężonym sformułowaniem Eulera-Lagrange’a (ang. Coupled Eulerian Lagrangian - CEL). Zgodnie z przedstawionym zarysem w przeglądzie literatury, model CEL zbudowany jest z nieruchomej siatki Eulera, którą cechuje całkowita odporność na zniekształcenia elementów skończonych. Model typu CEL stosunkowo niedawno został zaimplementowany w badaniach dotyczących modelowania procesów skrawania, a jego potencjał w przypadku analizy mikroobróbki skrawaniem uwzględniającej zjawisko minimalnej grubości warstwy skrawanej oraz wpływ konsekwentnych przejść ostrzy nie został jeszcze przebadany”.

„Przedstawiony nowatorski model CEL oraz realizowany w rozprawie program badań pozwoli nie tylko poszerzyć wiedzę na temat mechaniki procesu mikroskrawania, ale również przetestuje wydajność nowej metody w odniesieniu do możliwości zachowania ciągłości rozkładu zmiennych w przedmiocie obrabianym poddanym wielokrotnym intensywnym odkształceniom”.

Doktorant podjął pogłębioną analizę następujących zagadnień:

- stałych termomechanicznych modeli MES;
- konstruowania modelu CEL uwzględniającego przejście dwóch ostrzy;
- konstruowania podstawowego modelu ALE z granicami Lagrange'a.

Rozpatrując model konstytutywny Johnsona-Cooka, na podstawie danych literaturowych Doktorant przyjął parametry tego modelu oraz modelu zniszczenia dla stali C45 (tab.5.1), a także stałe termomechaniczne do zamodelowania oddziaływania dwóch brył w analizie temperaturowo-przemieszczeniowej MES dla stali C45 oraz narzędzia wykonanego z węglików spiekanych (tab.5.2).

Kontynuując podjęte badania dotyczące predykcji składowych siły całkowitej w układzie narzędzia oraz minimalnej grubości warstwy skrawanej Doktorant zaproponował nowatorski model MES ze sprzężonym sformułowaniem Eulera-Lagrange'a (CEL), uzyskując dzięki temu wgląd w mechanikę procesu mikroskrawania podczas konsekwentnych przejść dwóch ostrzy. Te analizy są uzupełnione oryginalnymi ilustracjami (rys.5.3 - rys.5.5) objaśniającymi zjawiska zachodzące w strefie mikroskrawania.

Do symulacji wybrał dynamiczny rodzaj analizy typu temperaturowo-przemieszczeniowego z jawnym całkowaniem, typowo stosowany przy analizie problemów o nieliniowej charakterystyce, gdy przedmiot obrabiany jest poddawany znaczącym odkształceniom.

Dla modelu Lagrange'a–Eulera (ang. *Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation* - ALE), podobnie jak w przypadku modelu CEL, zastosował dynamiczny rodzaj analizy typu temperaturowo-przemieszczeniowego z jawnym całkowaniem, uwzględniający przepływ ciepła na styku ostrza z przedmiotem obrabianym. Względny ruch główny w modelu został osiągnięty przez przypisanie prędkościowego warunku brzegowego do ostrza skrawającego, zaś przemieszczeniowy warunek brzegowy ogranicza jego swobodę ruchu w kierunku osi Y (rys.5.6). Przykłady symulacji na początkowym etapie zagłębiania się klina ostrza w przedmiot obrabiany zostały przedstawione na rys.5.7. Charakterystyczne dla tego modelu jest, iż pomimo znacznego zdeformowania przedmiotu obrabianego, następującego na skutek penetracji klina, w modelu ze sformułowaniem ALE utrzymana zostaje równomierna siatka, a topologia elementów przypomina pierwotną.

Rozdział 6 - Modele analityczne procesu mikrofrezowania (s.98 - s.110) Doktorant przedstawił na podstawie poszerzonych analiz literaturowych i badań własnych, tj.:

- model minimalnej grubości warstwy skrawanej na bazie przyrostów siły stycznej;
- hybrydowy model analityczno-numeryczny składowych siły całkowitej dla mikrofrezowania.

Autor rozprawy zastosował model do predykcji wartości h_{min} na podstawie średnich składowych siły całkowitej w układzie narzędzia, którego założenia zostały zastosowane do doświadczalnych prób mikrofrezowania stali C45 oraz do numerycznego modelu CEL. Wartość minimalnej grubości warstwy skrawanej h_{min} została oszacowana poprzez identyfikację punktu stagnacji na zaokrąglonej krawędzi skrawającej metodą przyrostu siły stycznej (rys. 6.1).

W celu zaimplementowania modelu szacującego wartość h_{min} należało określić matematyczny model dla składowej siły stycznej F_{tn} i promieniowej F_{rn} w płaszczyźnie normalnej (rys.6.2). Do oszacowania wartości h_{min} należy dokonać transformacji sił składowych z układu X,Y,Z do płaszczyzny normalnej wyznaczając wartości składowych F_{tn} i F_{rn} w funkcji grubości h , uwzględniając kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej λ_s mikrofrezu (rys. 6.3).

Do walidacji opracowanego modelu CEL mikroskrawania, Doktorant zastosował hybrydowy analityczno-numeryczny model składowych siły całkowitej. W modelu uwzględnił współczynniki proporcjonalności składowych siły całkowitej, obliczone na bazie symulacji numerycznych wykonanych w oparciu o model CEL (dla jednego oraz dwóch przejść ostrzy skrawających). Parametry geometryczne warstwy skrawanej zostały określone na bazie zależności analitycznych.

Zaadaptowany model uwzględnia wpływ minimalnej grubości warstwy skrawanej, statycznego ugięcia narzędzia oraz efekt akumulacji grubości warstwy skrawanej w celu zwiększenia dokładności estymacji chwilowego przekroju warstwy skrawanej w procesie mikrofrezowania. Predykcja efektywnej grubości warstwy skrawanej bazuje na zależnościach geometrycznych oraz statycznych, uwzględniając w modelu pamięć niezeskrawanych warstw materiału.

Schemat blokowy hybrydowego modelu analityczno-numerycznego do predykcji składowych siły całkowitej oraz efektywnej grubości warstwy skrawanej podczas mikrofrezowania został przedstawiony na rys.6.4.

W procesie mikroskrawania, ze względu na stosunek h/h_{min} można wyróżnić model obciążenia dla warunków dekohezji (skrawania) materiału (rys. 6.5.a) oraz warunków bruzdowania (rys. 6.5.b) co oznacza, że wartość parametru h_{min} wpływa na stan obciążenia ostrza.

W procesie mikrofrezowania stosowane wartości posuwu na ostrze f_z bardzo często zawierają się w zakresie poniżej jednego mikrometra co powoduje, że nawet niewielkie przemieszczenie części roboczej narzędzia może wpływać na wydajność procesu oraz rzutować na przebieg składowych siły całkowitej. Jednym z czynników okresowo występującym w funkcji obrotu narzędzia jest bicie promieniowe ostrza (rys.6.6), a także wpływ statycznego ugięcia narzędzia na efektywną grubość warstwy skrawanej (rys.6.7).

Oznacza to, że niezeskrawany materiał w i -tym przejściu ostrza będzie indukował wzrost chwilowej grubości warstwy skrawanej w kolejnym ($i + 1$) przejściu ostrza (rys.6.8)

W celu oszacowania efektywnej grubości warstwy skrawanej, $h_{ze}(\varphi)$, uwzględniającą efekt akumulacji oraz wpływ przemieszczenia części roboczej narzędzia w wyniku bicia promieniowego i ugięcia statycznego, Doktorant zaadaptował numeryczno-analityczną procedurę obliczeniową na bazie opracowania S. Wojciechowskiego i in. Wartości współczynników proporcjonalności bruzdowania i skrawania dla układów równań (6.8) i (6.9) w rozprawie zostały oszacowane na podstawie składowej stycznej (F_{tn}) oraz promieniowej (F_{rn}), wyznaczonych z serii symulacji modelem CEL.

Doktorant opracował odpowiednie modele regresji w postaci funkcji potęgowych dla zakresu bruzdowania i skrawania w postaci układów równań (6.18 i 6.19) oraz na wyznaczenie składowych siły całkowitej w układzie narzędzia (układy równań 6.20 i 6.21). Chwilowe wartości składowych sił w opracowanym modelu są transformowane do układu siłomierza na zależności trygonometrycznych (6.22).

Rozdział 7 - Wyniki i analiza badań (s.111 - s.168) zawiera syntezę dokonań mgr. inż. Marka Madajewskiego przedstawioną w dwóch grupach badań.

W badaniach wstępnych analiza dotyczyła (rys.7.1 - rys.7.10)

- wpływu gęstości siatki na zbieżność wyników i czasochłonność analizy w modelu CEL;
- porównania modeli MES typu CEL i ALE w zastosowaniu do modelowania procesu mikroskrawania.

W badaniach zasadniczych analiza dotyczyła (rys.7.11 - rys.48)

- analizy sił w układzie narzędzia zamodelowanych na bazie sprzężonego modelu Eulera-Lagrange'a (CEL) z dwoma przejściami ostrzy;
- analizy rozkładu zmiennych zamodelowanych na bazie sprzężonego modelu Eulera-Lagrange'a (CEL) z dwoma przejściami ostrzy;
- wpływu promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej rn na składowe siły całkowitej zamodelowanego na bazie sprzężonego modelu Eulera-Lagrange'a (CEL) z dwoma przejściami ostrzy;
- predykcji minimalnej grubości warstwy skrawanej metodą przyrostów siły stycznej do promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej;

- predykcji składowych siły całkowitej na bazie opracowanego hybrydowego modelu analityczno-numerycznego.

Każde z tych zagadnień zostało poddane obszernej, szczegółowej krytycznej dyskusji i zilustrowane odpowiednimi rysunkami, dokumentującymi wyniki badań w odniesieniu do analizowanych problemów. Komentując w skrócie uzyskane rezultaty należy m. in wymienić, że:

- wyniki analiz wskazują, że odkształcenia resztkowe oraz stan umocnienia materiału w warstwie wierzchniej po przejściu pierwszego ostrza wywierają ilościowy i jakościowy wpływ na wartość składowych siły całkowitej w drugim przejściu ostrza;
- efekt umocnienia warstwy wierzchniej po pierwszym przejściu ostrza wpływa korzystnie na zwiększenie podatności materiału na formowanie wióra, co koreluje z wynikami zaproponowanego modelu predykcji h_{min} na podstawie przyrostu składowej stycznej w odniesieniu do zaokrąglonej krawędzi skrawającej w płaszczyźnie narzędzia;
- potwierdza się zasadność stosowania zaproponowanej metody w oparciu o model CEL do wyznaczania granicy między ścinaniem materiału, a bruzdowaniem dla danej pary materiałów narzędzia i obrabianego przedmiotu;
- opracowane przez Doktoranta modele predykcyjne, uwzględniające warunki pracy drugiego ostrza, w symulacji CEL odznaczają się mniejszym błędem względnym oszacowania w porównaniu do wartości obliczonych na bazie modelu pojedynczego przejścia.

Uwaga: w niektórych miejscach pracy Doktorant stosuje zamiennie słowo „wielkość”, zamiast „wymiar”; np. na str.98 jest wyrażenie „... wielkość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej...”, zamiast „wartość promienia...”

Ponadto powinno się też stosować sformułowania: przy pomocy „kogoś”, ale za pomocą „czegoś”.

Rozdział 8 - Wnioski końcowe zawiera słuszne, końcowe stwierdzenie, że „**podstawowe hipotezy pracy zostały udowodnione**”

Zostały sformułowane jednoznaczne wnioski o charakterze poznawczym, utylitarnym oraz dotyczących kierunków dalszych badań. Są one efektem przeprowadzonych badań i dogłębnych analiz Autora rozprawy doktorskiej.

W swojej ograniczonej objętościowo recenzji rozprawy doktorskiej starałem się odnieść do wybranych, moim zdaniem głównych jej aspektów, które wyróżniają tę pracę i ukazują znaczący wkład Autora rozprawy.

Podsumowując całość przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Wyniki te poszerzają wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w obszarze mikroobróbki materiałów metalowych narzędziami o zdefiniowanej stereometrii ostrzy. Rozprawa doktorska porządkuje wiedzę w zakresie metodologii, metod identyfikacji oraz oceny stanu procesu mikroskrawania i jakości technologicznej mikrowyrobów. Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki poznawcze i znaczące walory utylitarne.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Marek Madajewski przedstawił w rozprawie obszerną, spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu zastosowania techniki i technologii mikroobróbki materiałów metalowych. **Wykazał, że dysponuje na wysokim poziomie usystematyzowanym zasobem wiedzy oraz umiejętności do realizacji prac badawczych i dalszego rozwoju naukowego.**

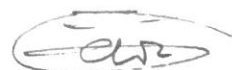
3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego, rozwojowego obszaru badawczego, związanego z techniką i technologią kształtowania mikrowyrobów. Obszerna zasobem informacji rozprawa doktorska została opracowana bardzo starannie pod względem edycyjnym i redakcyjnym.

Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości, a także istotne walory użyteczne. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Marka Madajewskiego zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marka Madajewskiego nt.: „Modelowanie mechaniki procesu mikroskrwania przy zastosowaniu metod numerycznych” 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 ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r., a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 23 lipca 2022 r.



Józef Gawlik

