

Dr hab. inż. Mariusz Deja, profesor uczelni

L.dz. RD/MD/08/2024

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Zakład Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
mariusz.deja@pg.edu.pl
tel.: 608-281-567

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ mgr. inż. Marcina Gołaszewskiego

Promotor: prof. dr hab. inż. Bartosz Powałka

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Królikowski

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Modelowanie procesu mikrofrezowania części
wytworzonych technologiami przyrostowymi

Gdańsk, sierpień 2024

1. Uwagi wstępne

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo nr WIMIM/195/2024 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, dr. hab. inż. Krzysztofa Danileckiego, prof. ZUT z dnia 3 lipca 2024 r. w sprawie wyznaczenia mojej osoby na recenzenta, oraz dołączony wydruk i wersja cyfrowa rozprawy doktorskiej.

Tytuł rozprawy doktorskiej: Modelowanie procesu mikrofrezowania części wytworzonych technologiami przyrostowymi.

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Marcin Gołaszewski.

Promotor: prof. dr hab. inż. Bartosz Powąłka.

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Królikowski.

2. Tematyka rozprawy

Podjęta tematyka rozprawy doktorskiej jest ważna w aspekcie naukowym oraz przemysłowym, zwłaszcza w branży elektronicznej do wytwarzania mikrokomponentów. Coraz częściej komponenty i mikrokomponenty mechaniczne o skomplikowanych kształtach wytwarzane są technologiami przyrostowymi. Wysokie wymagania wymiarowo-kształtowe wymuszają jednak dodatkową obróbkę na wybranych powierzchniach komponentu wytworzonego przyrostowo. Wytwarzanie hybrydowe łączące dwie techniki, tj. przyrostową i ubytkową, realizowane w skali mikro na jednym urządzeniu technologicznym jest niewątpliwie aktualnym trendem badawczo-rozwojowym wymagającym m.in. przeprowadzenia dokładnej oceny jakości przygotówki i zamodelowania procesu mikroskrawania. Poprawnie utworzony model pozwala na dobór optymalnych parametrów obróbkowych w celu uzyskania założonych wymagań konstrukcyjnych, jak również umożliwia monitorowanie przebiegu procesu i ewentualną korektę przyjętych parametrów. Przeprowadzone przez Doktoranta analizy i badania bezpośrednio mogą pomóc w spełnieniu wysokich wymagań technologiczno-konstrukcyjnych dzięki opracowaniu przez niego oryginalnego modelu uwzględniającego wpływ charakterystycznej dla elementów wytwarzanych metodą SLM struktury geometrycznej powierzchni o dużej nieregularności i chropowatości.

Doktorant uwzględnił w swojej pracy doświadczenia innych badaczy z obszaru mikroobróbki, w tym modelowania mikrofrezowania oraz wytwarzania hybrydowego. Bardzo dokładny przegląd literatury i ograniczone dane literaturowe odnośnie m.in. wpływu struktury geometrycznej powierzchni przygotówki wytworzonej przyrostowo na siły rejestrowane podczas mikrofrezowania oraz osiowej sztywności układu OUPN na jakość powierzchni skłoniły go do realizacji badań w tym zakresie, co było całkowicie uzasadnione.

Przeprowadzone badania charakteryzowały się również dużą innowacyjnością. Opracowany przez Doktoranta model posłużył do wytłumaczenia zjawiska powstawania anomalii w postaci podniesionych pasm, co do momentu pisania pracy nie było wyjaśnione.

Wyniki badań Doktoranta mogą posłużyć jako ogólne wytyczne do wytwarzania hybrydowego mikroelementów ze stopów aluminium oraz dla innych powszechnie stosowanych, ale bardziej wymagających stopów niklu, tytanu i stali. Potwierdza to również aplikacyjny, oprócz naukowego, charakter rozprawy.

3. Charakterystyka rozprawy

Praca liczy 152 strony i składa się z wykazu oznaczeń, siedmiu rozdziałów głównych, wykazu literatury oraz streszczenia w j. polskim i angielskim. Po syntetycznym wprowadzeniu do tematyki pracy,

obejmującym trendy w nowoczesnym mikrowytwarzaniu, Autor przedstawił w **rozdziale 2.** analizę przeglądu literatury z zakresu mikrofrezowania w aspekcie stosowanych narzędzi i parametrów obróbkowych, modelowania sił podczas obróbki, struktury geometrycznej powierzchni obrobionej i ugięcia statycznego narzędzi. Przegląd literatury kończy analiza wytwarzania hybrydowego obejmującego wytwarzanie przyrostowe i mikrofrezowanie, z charakterystyką stosowanych materiałów. W **rozdziale 3.** Doktorant opisuje tezę, cel i zakres pracy. **Rozdział 4.** obejmuje szczegółowy opis geometrycznego modelu mikrofrezowania, a **rozdział 5.** implementację aparatu matematycznego wykorzystanego w modelowaniu. **Rozdział 6.** opisuje badania doświadczalne przeprowadzone w celu weryfikacji opracowanych modeli. **Rozdział 7.** zawiera najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych prac. Wykaz literatury liczy 128 pozycji.

Istotne informacje w aspekcie realizowanego tematu zawarte zostały szczegółowo w następujących rozdziałach:

Rozdział 1. Wprowadzenie - z prawidłowym przedstawieniem problematyki badań oraz zasadności tematu.

Rozdział 2. Przegląd literatury – scharakteryzowany w odniesieniu do stanu wiedzy z zakresu modelowania mikrofrezowania. Doktorant przedstawił różnice między mikro- i makroobróbką oraz sposoby modelowania sił skrawania i obrabianych powierzchni. Uzasadnił możliwość stosowania obróbki hybrydowej do wytwarzania części z mikrocechami konstrukcyjno-technologicznymi. Szczegółowy przegląd literatury pozwoliły Doktorantowi na wyciągnięcie właściwych wniosków będących podstawą do postawienia tezy, celów i zakresu pracy oraz przedstawienia zrealizowanych zadań szczegółowych.

Rozdział 3. Teza, cel i zakres pracy – prawidłowo zdefiniowane, wynikające bezpośrednio z dogłębnego przeglądu literatury przedstawionego w Rozdziale 2. Doktorant przedstawił tezę naukową związaną z istotnym wpływem struktury geometrycznej powierzchni przygotówki na siły rejestrowane podczas mikrofrezowania części wytwarzanych metodą SLM.

Rozdział 4. Geometryczny model mikrofrezowania – szczegółowo opisany w konfiguracji uproszczonej, nieuproszczonej oraz prostej i odwrotnej. Konfiguracja nieuproszczona jest szczególnie przydatna w modelowaniu mikrofrezowania części wytwarzanych przyrostowo z uwagi na zmienny przekrój warstwy skrawanej będący wynikiem dużych nierówności powierzchni wyjściowej. Model prosty może posłużyć do predykcji sił skrawania lub struktury geometrycznej powierzchni obrobionej, a model odwrotny do monitorowania procesu obróbkowego i do oceny jakości procesu przyrostowego.

Rozdział 5. Implementacja aparatu matematycznego – wykorzystana przez Doktoranta do modelowania o różnym stopniu złożoności, począwszy od prostego modelu geometrycznego do uwzględnienia bicia oraz ugięcia narzędzia. Doktorant przedstawił działanie modelu w konfiguracji prostej oraz odwrotnej. Zaprezentowane sposoby modelowania, wyznaczania stałych materiałowych czy też opis mechanizmu backcuttingu świadczą o szerokiej wiedzy Doktoranta związanej z kinematyką oraz dynamiką analizowanego procesu mikrofrezowania, a także o jego wysokich umiejętnościach programistycznych.

Rozdział 6. Badania doświadczalne – ze szczegółowym planem badań, opisem stanowiska badawczego, zaawansowanej aparatury pomiarowej oraz wynikami badań weryfikujących różne aspekty opracowanych przez Doktoranta modeli, tj. zmienność rozkładu składowych sił skrawania, trajektorii narzędzia i kształtu powierzchni obrabianej. Doktorant sprawdził również konfigurację odwrotną modelu na rzeczywistej powierzchni komponentu wytworzonego metodą SLM. Rozdział ten potwierdza złożoność problematyki badawczej, ale również dojrzałość naukową Doktoranta i bardzo dobre podstawy teoretyczne, co umożliwiło przeprowadzenie zaawansowanych i wieloaspektowych badań.

Rozdział 7. Podsumowanie – przedstawione w odniesieniu do założonych celów i tezy oraz podkreślające innowacyjne aspekty i charakter rozprawy, pokazujące również możliwości kontynuowania podjętej tematyki.

Bibliografia – 128 pozycji literaturowych, głównie czasopismowych, ściśle związanych z realizowanym tematem.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Doktorant postawił na podstawie analizy literatury i badań własnych cel naukowy pracy, którym była budowa modelu sił oraz struktury geometrycznej powierzchni obrobionej podczas procesu mikrofrezowania ze szczególnym uwzględnieniem podatności mikronarzędzia oraz topografii powierzchni obrabianej przygotówki wykonanej metodą selektywnego spiekania proszków metalicznych (SLM). Sformułował również mocno powiązaną z celem naukowym tezę o istotnym wpływie struktury geometrycznej powierzchni przygotówki na siły rejestrowane podczas analizowanego procesu mikrofrezowania. Dwie tezy pomocnicze dotyczące wpływu osiowej sztywności układu OUPN na strukturę geometryczną powierzchni obrabianej oraz możliwości wnioskowania o strukturze geometrycznej powierzchni obrabianej przygotówki na podstawie rejestrowanych sił podczas mikrofrezowania wzbogacają zakres prowadzonych prac i wartość naukową rozprawy.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i modelowych niewątpliwie upoważniają do stwierdzenia, że cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte, a w konsekwencji również nastąpiło przybliżenie osiągnięcia pośredniego celu praktycznego ukierunkowanego na efektywną realizację mikroobróbki hybrydowej, tj. wytwarzania przyrostowego i mikrofrezowania na jednym urządzeniu technologicznym. Upoważniają również do przyjęcia postawionych tez naukowych, oraz potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Pozytywnie i wysoko oceniam wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie kinematyki oraz dynamiki analizowanego procesu mikrofrezowania, a także jego umiejętności programistyczne, które pozwoliły na opracowanie, a następnie eksperymentalną weryfikację modeli wg prawidłowo zaplanowanego planu badań. Przeprowadzone analizy potwierdziły silną zależność procesu mikrofrezowania od topografii powierzchni obrabianego materiału. Na podstawie geometrii przygotówki możliwa jest predykcja sił procesu, a na podstawie zmierzonych sił możliwa jest rekonstrukcja geometrii przygotówki. Badania i analizy przeprowadzone przez Doktoranta były konieczne z uwagi na specyfikę mikroobróbki oraz właściwości przygotówki. Rozprawa przyczynia się do lepszego poznania zjawisk w procesie mikrofrezowania po obróbce przyrostowej, zwłaszcza wpływu struktury geometrycznej powierzchni przygotówki na przebieg obróbki oraz stan i jakość powierzchni mikrokomponentów mechanicznych po mikrofrezowaniu. Jest to bardzo ważne zwłaszcza dla komponentów o wysokich wymaganiach technologiczno-konstrukcyjnych, a bardzo trudne do realizacji w przypadku cech technologicznych o małych wymiarach wytwarzanych przyrostowo.

Autor rozprawy przeprowadził wnikliwą analizę literatury kierunkowej z krytyczną dyskusją wyników badań w odniesieniu do dostępnych danych literaturowych.

Rozprawa doktorska niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z modelowaniem procesu mikrofrezowania części wytworzonych technologiami przyrostowymi. Modelowanie zostało zweryfikowane eksperymentalnie w aspekcie zmienności rozkładu składowych sił skrawania, trajektorii narzędzia i kształtu powierzchni obrabianej. Sprawdzono również konfigurację odwrotną modelu na rzeczywistej powierzchni komponentu wytworzonego metodą SLM. Doktorant przyjął prawidłową metodykę badań z właściwym doбором stanowiska badawczego i aparatury pomiarowej wykorzystanej w zaawansowanych i wieloaspektowych badaniach eksperymentalnych. **Analiza wyników eksperymentalnych i uzyskane wyniki potwierdzają złożoność**

problematyki badawczej, ale również dojrzałość naukową Doktoranta i bardzo dobre podstawy teoretyczne.

5. Uwagi do pracy

- 5.1. Badania eksperymentalne umożliwiły rekonstrukcję struktury geometrycznej powierzchni przygotówki. Czy oprócz potwierdzenia prawidłowych założeń modelowych można zdefiniować cele praktyczne takiej rekonstrukcji?
- 5.2. Obrabialność stopów aluminium może zredukować zużycie narzędzia, ale wymaga właściwego doboru parametrów obróbkowych. Jaki wpływ na opracowaną metodologię miałyby uwzględnienie zużycia narzędzia w trakcie obróbki? Czy doktorant analizował stan krawędzi skrawających po obróbce? Jaki charakter zużycia narzędzia jest spodziewany po mikroobróbce stopów aluminium?
- 5.3. Opracowany model dedykowany jest do symulacji procesu mikroskrawania elementów wytwarzanych technologiami przyrostowymi. Czy może być zaadoptowany do symulacji procesu mikrofrezowania po technologiach ubytkowych lub frezowania elementów wytwarzanych technologiami przyrostowymi?
- 5.4. Czy obróbka innych materiałów wymagać będzie tylko wyznaczenia stałych materiałowych?
- 5.5. W pracy badano wpływ poszczególnych czynników na zmiany chropowatości. Co wpłynęło na wybór parametrów chropowatości Sa, Sz i Rt oraz wg jakiej normy były one wyznaczone? Czy Autor pracy rozważał uwzględnienie w analizach również innych parametrów chropowatości, które mogłyby pomóc w lepszej charakterystyce obrabianej powierzchni i powierzchni przygotówki? Jakie parametry można by zastosować do scharakteryzowania specyficznych geometrii zarówno przed jak i po obróbce, o dużej chropowatości lub z anomaliami w postaci podniesionych pasm?
- 5.6. Jakie zalecenia wskazałby Doktorant wytwórcy narzędzi do mikrofrezowania części wytwarzanych przyrostowo? Czy wskazana byłaby modyfikacja geometrii krawędzi skrawającej?
- 5.7. Doktorant stwierdza, że konieczne jest ustalenie w przyszłych badaniach granicy dla której konieczne jest uwzględnienie struktury geometrycznej powierzchni obrabianej. Czy przeprowadzone badania upoważniają do określenia chociaż przybliżonej wartości granicznej?

6. Uwagi edytorskie

Praca napisana została bardzo starannie pod kątem edytorskim i językowym. Rysunki i wykresy są bardzo czytelne i przedstawiają wszystkie niezbędne opisy i informacje. Występują nieliczne błędy edytorskie i stylistyczne, np.:

- pomiędzy liczbami i jednostkami powinna być spacja;
- 16₁: jest „niskie”, powinno być „małe”;
- 22⁴, 40, 58, 89: jest „za równo”, powinno być „zarówno”;
- 22¹²: jest „wprowadzeni”, powinno być „wprowadzenie”;
- 35¹¹: jest „promieniowy”, powinno być „promieniowi”;
- 41₂: jest „zmienia”, powinno być „zmieniają”;
- 42¹⁰: jest „niuproszczonej”, powinno być „nieuproszczonej”;
- 55⁹: jest „wartości”, powinno być „wartość”;
- 72₇: jest „wprowadzenie go”, powinno być „jego wprowadzenie”;
- 79²: jest „sił”, powinno być „siły”;

- 83₃: jest „prowilu”, powinno być „profilu”;
- 107³: jest „backcuttingu”, powinno być „backcutting”;
- 121₇: jest „obciążoną”, powinno być „obciążone”;
- 126₃: jest „sił”, powinno być „siły”;
- 126₂: jest „frazowanie, powinno być „frezowanie”;

7. Uwagi końcowe

Praca napisana została w sposób zrozumiały z uwypukleniem istotnych treści. Podane uwagi mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Mam nadzieję, że będą pomocne przy przygotowywaniu artykułów do renomowanych czasopism naukowych. Uwagi te nie pomniejszają wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej pracy.

8. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Umiejętnie wykorzystał stan istniejącej wiedzy z zakresu mikrofrezowania. Przeprowadzone badania pozwoliły na potwierdzenie **istotnego wpływu struktury geometrycznej powierzchni przygotówki na siły rejestrowane podczas analizowanego procesu mikrofrezowania**. Praca stanowi oryginalny wkład do badań mikrofrezowania przygotówki ze stopów aluminium wykonanej przyrostowo, a w konsekwencji do aplikacyjności mikroobróbki hybrydowej. Doktorant opracował oryginalne modele sił oraz struktury geometrycznej powierzchni obrobionej podczas procesu mikrofrezowania ze szczególnym uwzględnieniem podatności mikronarzędzia oraz topografii powierzchni obrabianej przygotówki wykonanej metodą selektywnego spiekania proszków metalicznych (SLM). W ogólnej ocenie stwierdzam, że **Pan mgr inż. Marcin Gołaszewski** w pełni zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy, której tematyka jest zbieżna z badaniami prowadzonymi na świecie oraz z aktualnymi wymaganiami i oczekiwaniami przemysłu wytwarzającego mikrokomponenty.

Doktorant klarownie sformułował tezy, cele i zakres pracy oraz osiągnął cele naukowe i aplikacyjne pracy na drodze prawidłowo zaplanowanych i przeprowadzonych badań eksperymentalnych i modelowych. **W mojej opinii praca zasługuje również na wyróżnienie z uwagi na jej innowacyjny i użyteczny charakter oraz kompleksowy zakres badań i analiz. Tematyka pracy mieści się w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.**

Pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską i wnioskuję o dopuszczenie **Pana mgr. inż. Marcina Gołaszewskiego** do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Na podstawie przedstawionej opinii i w świetle dostępnej i znanej mi literatury naukowej stwierdzam, że praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przewidziane przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (tj. art. 187 ust. 1-3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i **może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

Gdańsk, 05.08.2024 r.



.....
/Mariusz Deja/