

**POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. Ignacego Łukasiewicza**

**WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA**

**Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji**

**dr hab. inż. Witold HABRAT prof. PRz**

profesor uczelni w grupie pracowników badawczo-  
dydaktycznych

al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

tel. (17) 865 14 91

e mail: witekhab@prz.edu.pl

Rzeszów, 06.08.2024 r.

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Gołaszewskiego pt.**

### **„Modelowanie procesu mikrofrezowania części wytworzonych technologiami przyrostowymi”**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie dr hab. inż. Krzysztofa Danileckiego prof. ZUT z dnia 03.07.2024 r. (L. dz. WIMiM/194/2024).

#### **1 Charakterystyka podjętej tematyki badawczej oraz celu i zakresu pracy**

Mikrofrezowanie, jako jedna z zaawansowanych technik mikrowytwarzania, odgrywa znaczącą rolę w nowoczesnym przemyśle. Jest nie tylko istotnym elementem innowacyjnych procesów produkcyjnych, ale także kluczowym czynnikiem umożliwiającym rozwój technologii w wielu branżach. W dobie miniaturyzacji, która znacząco wpływa na rozwój technologiczny, mikrofrezowanie umożliwia produkcję niezwykle precyzyjnych i małych komponentów, które są niezbędne w wielu dziedzinach, takich jak elektronika, medycyna, motoryzacja i innych.

Z zastosowaniem technologii mikrofrezowania możliwa jest m.in. produkcja małych implantów, stentów, elektrod oraz protez, które można łatwo umieścić w organizmie człowieka. Mikrofrezowanie znajduje zastosowanie w produkcji

systemów mikroelektromechanicznych, które są wykorzystywane w pojazdach samochodowych.

Wspomniane dążenie do coraz większej miniaturyzacji komponentów wymaga zastosowania zaawansowanych technik wytwarzania. Nie bez znaczenia jest przy tym rozwój technologii hybrydowych, w których łączy się różne metody produkcji, takie jak technologie przyrostowe (np. SLM) z obróbką ubytkową. Łączenie technologii przyrostowych z mikroobróbką w ramach wytwarzania hybrydowego stanowi innowacyjne podejście do produkcji, które łączy zalety obu metod. Pozwala na tworzenie skomplikowanych geometrii, optymalizację materiałową oraz redukcję czasu i kosztów produkcji. Technologia przyrostowa pozwala na tworzenie elementów o skomplikowanych kształtach, które byłyby trudne lub niemożliwe do uzyskania przy użyciu tradycyjnych metod obróbki. Mikroobróbka umożliwia następnie precyzyjne wykończenie tych elementów, poprawiając ich dokładność i jakość powierzchni. Perspektywy wdrożenia tego rodzaju rozwiązań wynikają z rozwoju technologii cyfrowych bliźniaków oraz zaawansowanych systemów monitorowania procesu, co pozwoli na jeszcze lepszą kontrolę jakości i optymalizację procesu produkcyjnego. W tym zakresie prowadzenie badań naukowych pozwala na budowę baz wiedzy niezbędnych do rozwoju i wzrostu efektywności wytwarzania.

Przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej było modelowanie sił i struktury geometrycznej powierzchni w procesie mikrofrezowania z uwzględnieniem podatności narzędzia oraz topografii powierzchni przedmiotu obrabianego wykonanego metodą selektywnego spiekania proszków metalicznych (SLM). W tym kontekście zakres merytoryczny recenzowanej pracy doktorskiej należy ocenić jako **niezwykle istotny**. Potwierdza to trafność i sensowność podjętej tematyki badawczej, która wpisuje się w aktualne zapotrzebowania w zakresie badań naukowych w obszarze mikroskrawania w odniesieniu do inżynierii mechanicznej. Uzyskane wyniki pracy mogą mieć istotne znaczenie naukowe i utylitarne w zakresie dalszego rozwoju technologii mikroobróbki.

Tytuł pracy jest zgodny z podjętą tematyką badawczą oraz treścią pracy. Cel pracy podany na str. 29, dotyczący opracowania 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), należy uznać za **trafny i jasno sprecyzowany**, choć dyskusyjne jest tu użycie pojęcia „mikronarzędzia”, gdyż w pracy nie określono zakresów tolerancji wykonania użytych narzędzi.

- *W tym miejscu proszę Autora o ustosunkowanie się do różnic w pojęciach „struktura geometryczna powierzchni” i „topografia powierzchni”, które zostały użyte w sformułowanym celu pracy.*

Dalej Doktorant formułuje **tezę główną pracy**, która zasadniczo jest poprawna. Zwróciłbym jednak uwagę, że użycie stwierdzenia „ma istotny wpływ” powinno być łącznie z zakresem badawczym odnoszącym się to tego stwierdzenia. W tym przypadku lepiej byłoby użyć „może mieć istotny wpływ”. Dalej zostały określone dwie tezy pomocnicze dotyczące oddziaływań sztywności układu UOPN na strukturę geometryczną powierzchni (SGP) obrobionej oraz możliwość rekonstrukcji SGP przygotówki na podstawie sił skrawania.

Przyjęty zakres pracy jest spójny i ściśle powiązany z tematem dysertacji. Został przedstawiony w formie zadań szczegółowych na str. 29, ale również częściowo uzupełniony schematem na rys. 4.1 odnoszącym się do struktury modelu hybrydowego. Należy podkreślić, że zakres badań jest bardzo obszerny i zawiera wszystkie niezbędne elementy.

## 2 Zakres i ocena poszczególnych części realizowanej pracy

Dysertacja została zrealizowana na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Bartosza Powalki, który znany jest ze znaczącego dorobku w zakresie szerokiego zakresu badań w dziedzinie inżynierii mechanicznej i mechatroniki, a jego prace mają istotne znaczenie zarówno dla środowiska akademickiego, jak i przemysłowego. **Strukturę rozprawy** stanowi wykaz oznaczeń, siedem numerowanych rozdziałów, w tym wprowadzenie i podsumowanie, bibliografia oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Układ pracy jest prawidłowy - typowy dla tego rodzaju prac eksperymentalnych z podziałem na przegląd literatury oraz badania właściwe.

Praca jest zasadniczo staranna i na wysokim poziomie, występuje jednak kilka drobnych błędów o charakterze redakcyjnym, przykładowo:

- str. 5 – zamiast „kładowa” powinno być „składowa”,
- str. 5 i późniejsze – dla oznaczeń fz, ap i ae powinno stosować się indeksy dolne,
- zamiast „um” powinno być „ $\mu\text{m}$ ”,
- w literaturze polskojęzycznej stosuje się przecinek zamiast kropki dziesiętnej,
- dwa razy występuje podrozdział 5.7.1.
- str. 37 – zamiast „zamodelowano” powinno być „zamodelowana”,
- str. 42 – w opisie rys. 4.8 powinno być „nieuproszczonej”,
- str. 97 – powtórzenie (6.9)(6.9),
- str. 119 – zamiast „Rys. 6.26, Rys. 6.27, Rys. 6.28” powinno być „Rys. 6.26-6.28”,
- str. 120 i inne – w opisie rysunków zamiast „maximum” powinno być „maksimum”,
- str. 124 – niefortunny zwrot „geometrią procesu frezowania” – powinno być „kinematyką procesu frezowania”,
- str. 124 – niefortunny zwrot „niższe partie ostrza”,

- rys. 6.31 – zamiast „powierchnia” powinno być „powierzchnia”;
- str. 129 – niewłaściwy styl akapitu – mnóstwo powtórzeń.

We wprowadzeniu (rozdział pierwszy) do pracy Autor zaprezentował kontekst badań w odniesieniu do trendów w nowoczesnym przemyśle i uzasadnił genezę podjętej tematyki badawczej.

Przegląd literatury zawarto w rozdziale drugim. Autor przedstawił charakterystykę procesu mikrofrezowania wraz z budową narzędzi skrawających. W dalszej części odniósł się do modelowania mikroobróbki z podziałem na modelowanie sił, SGP oraz ugięcia narzędzia. Analizę stanu wiedzy kończy podrozdział dotyczący wytwarzania hybrydowego. Brak jest natomiast wyszczególnienia luk w obecnym stanie wiedzy, na które odpowiedzią jest zrealizowana praca.

W rozdziale trzecim został określony cel prac, tezy i zadania szczegółowe. Ocenę tej części przedstawiono we wcześniejszym punkcie recenzji.

W rozdziale czwartym został przedstawiony model mikrofrezowania poprzez algorytm działania i możliwe konfiguracje. Kwestią dyskusyjną jest tytuł rozdziału głównego „Geometryczny model mikrofrezowania”, który pozostaje w pewnym konflikcie z podrozdziałem 5.1. „Model geometryczny”.

- *Na początku rozdziału 4 Autor stwierdza, że „w prezentowanej pracy przedstawia się model hybrydowy”, podczas gdy w podpisie do rys. 4.1. jest mowa o „modelu geometrycznym”, który stanowi jeden z modułów na wskazanym rysunku. Czy tytuł rozdziału nie powinien brzmieć „Hybrydowy model mikrofrezowania”?*
- *Na str. 33 Autor stwierdza, że „kontakt pomiędzy narzędziem a materiałem obrabianym wyznacza się po zakreśleniu pełnego obrotu przez ostrze, co znacząco skraca czas działania modelu”. Czy w takim przypadku odpowiada to tworzeniu powierzchni poprzez algebrę Boole’a odejmując bryłę wyznaczoną przez powierzchnię działania ostrza od geometrii półfabrykatu w dyskretnych okresach czasu wynikających z posuwu na obrót?*

W rozdziale piątym Autor przedstawił sposób realizacji algorytmu działania zaproponowanego modelu hybrydowego przy zastosowaniu narzędzi matematycznych. Uwzględniono przy tym model geometryczny, model bicia promieniowego i osiowego oraz predykcję składowych siły całkowitej. Omówiono sposób modelowania ugięcia narzędzia oraz wyznaczanie stałych materiałowych. Ponadto wyjaśniono jak modelowane jest zjawisko *backcuttingu* oraz rekonstrukcja powierzchni. Zawartość rozdziału piątego stanowi główny element pracy składający

się na opracowany model hybrydowy procesu mikroskrawania. Jest on spójny i ma uzasadnienie w przeprowadzonej analizie.

- *Brakuje, wyszczególnienia na końcu rozdziału elementów oryginalnych zaproponowanego modelu hybrydowego.*

W **rozdziale szóstym** zawarto badania doświadczalne mające na celu weryfikację poszczególnych modułów modelu mikroskrawania. Przedstawiono plan eksperymentu i stanowisko badawcze oraz cztery badania weryfikujące odpowiednio model o zmiennym rozkładzie składowych siły skrawania, model obróbki ze zmienną trajektorią, model obróbki powierzchni swobodnej oraz działania konfiguracji odwrotnej. Przeprowadzone badania są zrealizowane poprawnie a wnioski wyciągnięte właściwie. Pozostaje jednak kilka kwestii dyskusyjnych. W mojej ocenie warunki badań doświadczalnych powinny być czytelniej określone w szczególności w odniesieniu do istotnych torów pomiarowych i narzędzi, jak np. pomiary składowych siły skrawania. Wszystkie informacje co prawda są zawarte w rozdziale, jednak ułożenie ich tabelarycznie z uzasadnieniem wyboru materiałów i narzędzi skrawających wraz ze szczegółowym opisem kryteriów wyboru ułatwiłoby analizę wyników badań.

- *Proszę o uzasadnienie wyboru materiałów do testów dla poszczególnych badań. Zastosowano materiały wykonane w technologii SLM i konwencjonalne.*
- *Jak zdefiniowano kryterium poprawności działania poszczególnych modułów modelu hybrydowego? Autor w tekście stwierdza np. „pomimo niedokładności modelu w opisie zjawisk związanych z odkształceniami plastycznymi materiału obrabianego podczas procesu mikrofrezowania należy uznać, że model działa prawidłowo”. W mojej ocenie rzeczywiście modele działają prawidłowo, jednak jest to ocena subiektywna, brakuje określenia kryterium statystycznego.*
- *Proszę podać uzasadnienie potrzeby wyznaczenia struktury geometrycznej powierzchni na podstawie zarejestrowanych sił – model odwrotny. Bardziej zasadna wydaje się rekonstrukcja struktury wewnętrznej wynikającej z parametrów metody SLM.*
- *Z czego wynikają różnice w szerokości pasma rekonstruowanego względem pasma obrabianego (rys. 6.39)?*

Dysertacja kończy się **podsumowaniem** w którym Autor uzasadnił spełnienie celu pracy oraz potwierdził udowodnienie postawionych tez. Wyszczególnił kluczowe aspekty utworzonego modelu. Wnioski sformułowane na końcu pracy są uzasadnione przeprowadzonymi badaniami i mają istotne znaczenie praktyczne.

- *W podsumowaniu Autor zaznacza, że „w prezentowanej pracy przedstawiono model geometryczny mikrofrezowania narzędziem o dowolnej geometrii z uwzględnieniem trajektorii frezu oraz struktury geometrycznej powierzchni przygotówki”. Czy stwierdzenie „narzędziem o dowolnej geometrii” nie jest w tym przypadku pewnym nadużyciem.*

Literatura zamieszczona w pracy jest aktualna. Doktorant odwołuje się do 128 pozycji.

### **3 Ogólna ocena pracy**

Doktorant podjął się istotnego zagadnienia modelowania procesu mikrofrezowania części wytworzonych technologiami przyrostowymi. Należy zaznaczyć, że bez wątplenia **cel rozprawy został osiągnięty**, a merytoryczna część pracy jest na wysokim poziomie.

Pod względem edytorskim praca napisana jest poprawnym językiem a sformułowane zdania nie stwarzają problemów z płynnością czytania i analizą wyników badań. Zamieszczone w pracy rysunki wykonane są z akceptowalną starannością i mają swoje uzasadnienie w tekście. Pewne drobne błędy stylistyczne, literowe czy redakcyjne nie umniejszają jakości dysertacji, nie mogą więc stanowić podstawy do kwestionowania wartości pracy. Pod względem metodologii prowadzenia badań rozprawa jest poprawna. Literatura jest aktualna i dobrana zgodnie z tematem pracy. Układ rozprawy i podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest logiczny. Autor zasadniczo posługuje się właściwymi pojęciami.

Z przedstawionej powyżej oceny poszczególnych części dysertacji wynika, że praca jest oryginalna, logiczna i spójna merytorycznie. Doktorant wykazał się ogólną **wiedzą teoretyczną i umiejętnościami w prowadzeniu badań naukowych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna**. Przedstawiona powyżej ocena potwierdza oryginalność opracowanego w pracy zagadnienia naukowego.

### **4 Wniosek końcowy**

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska **przyczynia się do poszerzenia wiedzy w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna**, a przede wszystkim w zakresie mikroobróbki, co przyczynia się do rozwoju tej technologii produkcji.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Gołaszewskiego pt. **„Modelowanie procesu mikrofrezowania części wytworzonych technologiami przyrostowymi”**, spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. Nr 2018 poz. 1668 z późn. zm.) *Prawo*

o szkolnictwie wyższym i nauce, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria mechaniczna wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 lipca 2018 r. W związku z tym **wniosuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony**. Biorąc jednocześnie pod uwagę zakres i jakość zrealizowanych badań, oryginalność zastosowania i aktualność podjętej tematyki **wniosuję jednocześnie o wyróżnienie pracy**.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Andrzej Witold', is written in a cursive style.