

dr hab. inż. Andrzej Typiak, prof. WAT
Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Robotów i Konstrukcji Maszyn
ul. gen S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
andrzej.typiak@wat.edu.pl

Warszawa 26 marzec 2023 r.

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Ornata
na temat:**

„Synteza narzędzi dedykowanych implementowanych w zrobotyzowanych aplikacjach do obróbki części silników lotniczych”

Promotor: dr hab. inż. Andrzej Burghardt, prof. PRz
Promotor pomocniczy: dr inż. Dariusz Szybicki

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Ornata było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza Pana dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz z dn. 30 listopada 2022 roku.

1. Ocena aktualności wybranego tematu rozprawy doktorskiej

Opracowana przez mgr. inż. Artura Ornata rozprawa ma charakter wdrożeniowy i dotyczy opracowania i implementacji narzędzi stosowanych w zrobotyzowanym gratowaniu elementów silników lotniczych.

Istotnym procesem technologicznym w produkcji elementów silników lotniczych jest obróbka ubytkowa. Po każdym etapie tego procesu, elementem ubocznym i niepożądanym są ostre krawędzie i wypływki materiału na krawędziach powierzchni podlegających obróbce. Dlatego też konieczne było wprowadzenie do procesu dodatkowej operacji zatępienia krawędzi. Operacje te stanowią ok. 10% ogółu roboczogodzin przypadających na obróbkę danego detalu. Tylko 20-30% operacji zatępienia ostrych krawędzi jest możliwe do zautomatyzowania stosując centra obróbcze CNC, ze względu na ograniczenia ekonomiczne i możliwości samych maszyn CNC. Pozostałe 70-80% tych operacji do niedawna pozostawało w obszarze obróbki ręcznej.

Możliwość wykorzystania robotów do obróbki mechanicznej pojawiła się stosunkowo niedawno wraz z rozwojem sensorów kontrolujących siłę docisku. Umożliwiły one zminimalizować niedoskonałości w procesie generowania trajektorii ramienia robota, takie

jak mała dokładność oraz niska sztywność konstrukcji, co praktycznie uniemożliwiało skuteczne zastosowanie robotów do celów precyzyjnej obróbki mechanicznej. Uwzględniając czynnik ekonomiczny (stanowiska zrobotyzowane są kilkukrotnie tańsze od centr CNC) wykorzystanie robotów do celów produkcyjnych staje się obecnie bardzo pożądane. Jednakże proces wdrożeniowy stanowisk zrobotyzowanych jest nie tylko pracochłonny, ale i złożony ze względu na specyfikę narzędzi adaptacyjnych i braku wiedzy odnośnie ich stosowania, ponieważ jest to obszar badawczy w początkowej fazie poznawczej. Ponadto wysokie wymagania jakościowe obowiązujące w branży lotniczej, skomplikowana geometria detali czy też trudno obrabialne materiały sprawiają, że problematyka ta stawia wiele wyzwań. Nie bez znaczenia jest fakt, że wiedza w tym obszarze stanowi pilnie strzeżoną tajemnicę firm.

Dlatego też tematyka i obszar badań zawarty w recenzowanej rozprawie jest zasadny zarówno dla rozwoju dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna jak też z punktu widzenia firmy Pratt & Whitney Rzeszów S.A.

2. Układ rozprawy doktorskiej i informacja o jej poszczególnych częściach

W wersji drukowanej praca liczy 166 stron i składa się z 9-ciu rozdziałów głównych, literatury, załączników, oraz streszczenia w j. polskim i angielskim.

We wstępie Doktorant uzasadnia podjęcie tematu pracy, przybliża jej problematykę oraz opisuje główne poruszane zagadnienia. Wprowadzenie do dysertacji jest zwarte i w sposób interesujący uzasadnia podjętą tematykę badawczą. Doktorant rozpoczyna od zarysu zagadnień związanych z historią działalności firmy Pratt & Whitney Rzeszów S.A. by następnie przejść do zagadnień związanych z robotyzacją produkcji przemysłowej i oczekiwań związanych z rozwiązaniem problemów umożliwiających wprowadzenie automatyzacji procesów zatepienia krawędzi detali silników lotniczych.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawia cel i zakres swojej rozprawy doktorskiej. Jest to dość oryginalny układ rozprawy, gdyż zwykle cel pracy podawany jest po analizie literaturowej rozpatrywanego obszaru badawczego. Zapewne podyktowane jest to genezą doktoratu, związaną z potrzebą wdrożenia procesu automatycznego zatepienia krawędzi, która wyniknęła z konieczności zwiększenia jakości produktów. Nakreślony cel pracy, jakim jest „synteza narzędzi implementowanych w aplikacjach zrobotyzowanych, opracowanie technologii realizowanych z ich wykorzystaniem oraz wdrożenie uzyskanych rozwiązań w obszarze produkcji elementów silników lotniczych” jest celem złożonym.

Ta złożoność celu wynikała z kilku uwarunkowań leżących u podstawy doktoratu. Najistotniejsze z nich to wzrost kosztów pracy ludzkiej, co było genezą poszukiwania rozwiązań w obszarze robotyzacji ręcznej obróbki mechanicznej, wzrost wymagań jakościowych poprzez eliminację z procesu wytwarzania czynnika ludzkiego, którego występowanie związane jest z ryzykiem błędów powodowanych przez pomyłkę, stres, zmęczenie. Kolejne uwarunkowanie to zmiany w świadomości ludzkiej w zakresie wpływu szkodliwych warunków pracy (zapylenie, hałas, materiały rakotwórcze) na zdrowie oraz podyktowane tym zmiany przepisów UE.

W rozdziale brakuje wyraźnego sformułowania tezy naukowej pracy na podstawie której można przyjąć etapy rozwiązywania problemu naukowego. Przedstawiony zakres pracy

obejmuje opis przebiegu kolejnych etapów badań. W pracy naukowej, a taką niewątpliwie jest rozprawa doktorska, informacja dotycząca tezy naukowej i przyjętej metodyki badawczej umożliwi pełniejszą analizę realizowanej metodyki badawczej.

W rozdziale trzecim „Stan wiedzy”, Doktorant skupia się głównie na analizie rozwiązań w obszarze zrobotyzowanych narzędzi stosowanych do obróbki elementów lotniczych rozpoczynając od pasywnych narzędzi mechanicznych, następnie pasywnych narzędzi pneumatycznych, narzędzi aktywnych z kontrolą siły. W dalszej części przedstawia stan wiedzy w obszarze zrobotyzowanych, bezdotykowych narzędzi pomiarowych wykorzystanych w eksperymentalnej części swojej pracy. Szczegółowo analizuje stosowane obecnie metody wyznaczania centralnego punktu narzędzia (TCP) w zastosowaniu do skanera laserowego. W końcowej części rozdziału przeprowadza analizę dostępnych rozwiązań w obszarze monitorowania stanu procesu zrobotyzowanego, co jest niezwykle istotne w kontekście realizowanych prac badawczych, mających na celu opracowanie narzędzia oraz określenie pożądanych warunków jego pracy.

W rozdziale czwartym, stanowiącym niewątpliwie najistotniejszą część recenzowanej rozprawy nie tylko ze względu na jego obszerność (60 stron), ale głównie z uwagi na fakt, że zawarty jest w nim oryginalny dorobek Doktoranta, przedstawiono syntezę narzędzi do zrobotyzowanej obróbki elementów silników lotniczych. Istotą prowadzonych prac badawczych było opracowanie technologii obróbki, wyselekcjonowanie odpowiednich narzędzi oraz dobór parametrów ruchu manipulatora robota tak, aby osiągnąć założone parametry obrabianych elementów.

Doktorant podjął się wyzwania polegającego na opracowaniu rozwiązania, którego możliwości w zakresie precyzji obróbki mogły konkurować z obróbką ręczną. Takie wyzwanie nie jest trudne jeżeli rozpatrujemy możliwości realizacji pracy ciągłej składającej się z powtarzających się czynności. Wyzwaniem jest zapewnienie precyzji automatycznego ruchu narzędzia w porównaniu z obróbką ręczną, w której występuje zewnętrzne sprzężenie wizyjne, akustyczne i siłowe, a ponadto sprzężenia te działają równolegle. W odniesieniu do sterowania automatycznego z uwagi na wysoki poziom hałasu w hali produkcyjnej, który wprowadza duże zakłócenia, trudno jest wykorzystywać informację dźwiękową. W odniesieniu do systemów wizyjnych przeprowadzone przez Doktoranta testy wykazały, że z uwagi na zmiany powierzchni obrabianej z matowej na błyszczącą, oraz zmiany warunków oświetlenia w halach produkcyjnych, koniecznym jest stosowanie filtrów oświetlaczy kabin. Z uwagi na zmienne warunki środowiskowe, Doktorant, w pętli sprzężenia zwrotnego, zastosował układ z kontrolą siły. Rozwiązanie to było podyktowane także względami ekonomicznymi.

Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność przyjętego założenia, że zasadnym jest stosowanie zarówno robotów jak i wytypowanych narzędzi w zrobotyzowanym gratowaniu. Uzyskane wartości zatępienia wynikają z typu zastosowanego narzędzia, wartości posuwu robota oraz liczby wykonanych przejść narzędzia. W związku z uzyskanymi pozytywnymi wynikami badań, celowym było prowadzenie prac związanych z oceną przydatności poszczególnych typów narzędzi. Istotnym w przypadku robotyzacji procesu gratowania jest również zastosowanie automatycznej zmieniarce narzędzi, umożliwiającej wymianę

narzędzia w trakcie procesu, co umożliwia uzyskanie w pełni zautomatyzowanego procesu bez konieczności ingerencji człowieka w trakcie jego trwania.

W rozdziale piątym Doktorant przedstawił opis, wykorzystanego w pracy, oprogramowania diagnostycznego. Zaprezentował trzy programy do monitorowania pracy stacji zrobotyzowanych firmy ABB z kontrolerem IRC5. Prezentując ich możliwości i funkcjonalności przedstawił także przemysłowe przykłady ich wykorzystania. Prezentowane programy dzięki możliwości monitorowania, rejestracji i przetwarzania danych mogą poszerzyć możliwości implementacji stacji zrobotyzowanych na bardziej wymagające procesy technologiczne. Wykorzystanie wymienionych narzędzi informatycznych w wielu przypadkach pozwoliło Doktorantowi na znaczne skrócenie czasu programowania robotów, a w niektórych przypadkach takich jak np. optymalizacja poboru energii przynosi efekty finansowe, co ma istotne znaczenie w doktoracie wdrożeniowym.

Wybrane oprogramowanie było stosowane do realizacji zrobotyzowanego procesu zatępienia krawędzi części o zmiennym kształcie stosowanych w silnikach lotniczych z użyciem systemu automatycznej adaptacji trajektorii narzędzia. Prace realizowano dla dyfuzora silnika V2500 stosowanego w samolotach Airbus A320 oraz McDonnell Douglas MD-90. Ponadto oprogramowanie monitorujące szeroko wykorzystywano w pracach dotyczących automatyzacji obróbki cienkościennych korpusów przekładni lotniczych, wykonanych ze stopów lekkich. Wykorzystanie programów do monitorowania procesów zrobotyzowanych robotów może stanowić użyteczne narzędzie dla opracowywania nowych rozwiązań.

Rozdział szósty zawiera opis zaproponowanych rozwiązań układów do kontroli parametrów obrabianych elementów, polegających na wykorzystaniu wiązki laserowej. W pierwszym etapie badano wykorzystanie wiązki lasera 2D, której przemieszczanie, pozycjonowanie i orientowanie jest realizowane przez ramię robota. Przeprowadzona analiza wykazała, zależność otrzymanych wyników od szerokości pola pomiarowego, co w konsekwencji uniemożliwiło automatyzację realizowanego procesu. Dlatego opracowany został autorski algorytm przetwarzania otrzymanych wyników. Realizowane pomiary mogą być inicjowane w trakcie obróbki korpusu lub bezpośrednio po jej zakończeniu, a zapisane wyniki umożliwiają wygenerowanie raportu pomiarowego. Jako wzorzec, do którego odniesiono uzyskane wyniki pomiarów wykorzystano zatwierdzoną przez PWR metodę pomiarową realizowaną za pomocą odcisków.

W drugim etapie badań zastosowano trójwymiarowy skanera optyczny. Pozyskane dane geometryczne z obiektu fizycznego, są wykorzystywane do budowy wirtualnego trójwymiarowego modelu zeskanowanego obiektu. Model ten może być używany do różnych zastosowań, takich jak inżynieria odwrotna, szybkie prototypowanie, czy też kontrola jakości. Otrzymane w czasie badań wyniki pomiaru weryfikowano z pomiarami wykonanymi laserowym narzędziem GapGun Pro i metodą odcisku, uzyskane wyniki były zbieżne.

W rozdziale siódmym Doktorant przedstawił algorytm wyznaczania geometrii narzędzia. Korzystanie z zewnętrznych systemów pomiarowych wiąże się z dokładnością wznaczenia pozycji końcówki manipulatora robota. Położenie efektora robota opisuje się za pomocą jego pozycji oraz orientacji w zdefiniowanym układzie odniesienia najczęściej związanym z robotem.

W celu zdefiniowania punktu TCP, Doktorant opracował autorski algorytm, który umożliwia, na podstawie czterech pomiarów określenie pozycji i orientacji narzędzia. Nowatorstwo algorytmu polega na możliwości zdefiniowania punktu TCP przy wykorzystaniu dowolnego elementu stożkowego, w odróżnieniu od istniejących rozwiązań bazujących na pomiarach wykorzystujących kulę o znanych wymiarach. Przeprowadzone badania symulacyjne w programach RobotStudio oraz Maple, oraz weryfikacja eksperymentalna umożliwiły nie tylko sprawdzenie działania algorytmu, ale wykazały jego dużą użyteczność.

Rozdział ósmy rozprawy zawiera informacje dotyczące wdrożenia opracowanych rozwiązań zgodnie z harmonogramem ich realizacji w PWR. Przedstawiono trzy przykłady wdrożenia opracowanych narzędzi i technologii zrobotyzowanych, wykorzystanych w warunkach przemysłowych do produkcji: dyfuzora silnika V2500, korpusu przekładni ADT oraz kół zębatych przekładni FDGS. Wdrożenie udokumentowano zdjęciami, przytoczono wymogi jakościowe na podstawie dokumentacji, a wszystkie typy dobranych narzędzi dla poszczególnych procesów zawarto w załączniku.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono podsumowanie przedstawionych w dysertacji rozważań. W rozdziale tym Doktorant skupił się w głównej mierze, na opisie w sposób chronologiczny przebiegu prac związanych z przebiegiem doktoratu, „unikając” przedstawienia w sposób syntetyczny własnego dorobku naukowego, który zawarty jest w poprzednich rozdziałach rozprawy.

Pewien niedosyt, w sformułowanych wnioskach budzi także brak przedstawiania kierunków dalszych prac badawczych, ukierunkowanych na automatyzację i autonomizację procesów obróbki elementów silników lotniczych..

Kolejny nienumerowany rozdział zawiera wykaz cytowanej literatury obejmującej 119 pozycji. Są to w znacznej części prace wydane po 2015 roku, czyli pozycje z ostatnich dziesięciu lat choć trafiają się też pozycje wydane przed rokiem 2000 (osiem pozycji), które są cytowane z tego względu, że są kanonem literatury z rozpatrywanego obszaru badawczego.

W pracy zamieszczono także załącznik „Lista narzędziowa do obróbki zewnętrznej strony kadłuba ADP, oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Struktura rozprawy jest przemyślana i logicznie uporządkowana, choć odbiega od tradycyjnie przyjętego kanonu rozpraw doktorskich.

3. Ocena realizacji celu pracy i zastosowanej metody badawczej

Cel pracy został jasno sprecyzowany w rozdziale 2 rozprawy na stronie 13 i brzmi następująco: "Celem pracy była synteza narzędzi implementowanych w aplikacjach zrobotyzowanych, opracowanie technologii realizowanych z ich wykorzystaniem oraz wdrożenie uzyskanych rozwiązań w obszarze produkcji elementów silników lotniczych."

Pod względem poziomu naukowego, pracę mgr inż. Artura Ornata oceniam, jako dobrą, przede wszystkim ze względu na oryginalne osiągnięcia w zakresie opracowania zautomatyzowanej metody zatępienia krawędzi elementów silników lotniczych.

W rozprawie, Autor wykazał, że opracowana metoda pozwala na automatyzację procesu zatepiania krawędzi, którego to przebieg uzależniony jest od wielu czynników, a trudno jest oszacować poziom wpływu poszczególnych, mierzonych parametrów na realizowany proces.

Opracowana autorska metoda kompleksowego procesu zatepiania krawędzi pozwala na automatyzację obróbki elementów przekładni silnika lotniczego. Na szczególną uwagę zasługują detale odlewane, gdzie występuje tzw. nieokreśloność kształtu i położenia krawędzi podlegających obróbce, spowodowane m.in. skurczami odlewniczymi. Dla tej grupy detali operacje zatepiania krawędzi przy użyciu maszyn CNC są bardzo skomplikowane i ich opracowanie jest pracochłonne oraz wymagające drogiego wyposażenia (np. sondy skanujące). To rozwiązanie jest nieekonomiczne, dlatego też dla tej grupy detali stosuje się obróbkę ręczną. Opracowana technologia przy użyciu robota przemysłowego stanowi swoistą rewolucję w tym obszarze przynosząc konkretne wymierne korzyści materialne – redukcja czasu obróbki ponad 50 %, jakościowe – zdecydowana poprawa powtarzalności i stabilności obróbki mechanicznej, oraz poprawa warunków pracy operatora (całkowita eliminacja zapylenia i hałasu). W pełni automatyczny proces w zamkniętej przestrzeni całkowicie odseparowuje operatora od niebezpiecznej strefy obróbczej.

W celu kompleksowego realizowania zadania przeprowadzono prace badawcze w kilku niezależnych obszarach, które we wzajemnym powiązaniu tworzą kompletne funkcjonalne rozwiązanie:

1. Wyselekcjonowano oraz opracowano szereg narzędzi obróbczych, dzieląc je na trzy grupy. Pierwsza z nich to narzędzia pasywne dla których po selekcji ze względu na ich właściwości obróbcze przeprowadzono szereg prób i badań jakości powierzchni uzyskanej po ich zastosowaniu.
2. Wyłoniono suboptymalne parametry obróbki spełniające wymagania kształtowo-wymiarowe obrabianych powierzchni. Są to w większości dedykowane rozwiązania, niejednokrotnie wspomagane przez specjalne kompensatory zmieniające ich charakterystykę pracy. Drugą grupę stanowią narzędzia z pneumatyczną progresją siły nacisku, dla których przeprowadzono dogłębną analizę parametrów procesu, wykorzystując wskaźniki jakości wyselekcjonowano suboptymalny zbiór parametrów spełniających wymagania procesu. Ze względu na konieczność zachowania stabilności procesu opracowano procedurę doboru parametrów dla obszaru pierwszego kontaktu narzędzia z obrabianym materiałem. Dla trzeciej grupy narzędzi z układem kontroli siły przeprowadzono wnikliwe badania nad określeniem dolnego zakresu stosowanych sił docisku, a ten zakres ze względu na niewielką ilość zbieranego materiału podczas obróbki detali lotniczych, jest niezmiernie istotny.
3. Opracowano autorskie narzędzie znacznie polepszające stabilność procesu, jak również przeprowadzono szereg badań mających na celu dobór parametrów systemu zrobotyzowanego z układem kontroli siły FC. Odnosnie FC biorąc pod uwagę dwa główne parametry procesu, współczynnik zmiany siły FC oraz współczynnik tłumienia D poprzez badania statystyczne, określając wskaźniki jakości, dobrano najlepsze parametry obróbki. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że uzyskane wielkości zatepiania są bliskie powtarzalności robota przemysłowego.

4. Przeprowadzono weryfikację efektów procesu, poprzez wykonywanie automatycznych pomiarów z wykorzystaniem profilometru laserowego. O ile pomiary płaskich ściąg – faz nie nastęrczają większych problemów, to pomiary promieni przejścia wymagały każdorazowo interwencji użytkownika. W celu automatyzacji procesu opracowano autorskie oprogramowanie, które poddano doświadczalnej weryfikacji.

4. Wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny i ocena możliwości prowadzenia samodzielnej działalności naukowej

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Ornata mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna. Moja ocena pracy jest wysoka, pomimo pewnej liczby uwag edytorskich.

Recenzent jest pełen uznania dla Doktoranta za uzyskanie interesujących wyników naukowo-badawczych w przedłożonej rozprawie doktorskiej, która stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego i wartościowy wkład użytkarny do dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. Przekazane Doktorantowi do dyskusji uwagi dotyczyły edycji rozprawy i nie umniejszają jej wartości merytorycznej.

Analizując zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że postawione i zrealizowane w rozprawie zadania mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Na podkreślenie zasługuje także fakt, że przyjęte założenia modelowe mają odpowiednie odniesienie do literatury, a zamieszczone w pracy wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych dobrze ilustrują tok realizacji pracy, potwierdzają prawidłowość sformułowanych wniosków oraz stanowią dobrą bazę do dalszych badań.

Za oryginalne osiągnięcia Doktoranta uważam następujące opracowania umieszczone w Dysertacji:

- zrobotyzowanej stacji i technologii obróbki dyfuzora silnika V2500 realizowanej z wykorzystaniem robota z kontrolą siły, realizacji ścieżek w ruchach zależnych (multimove) oraz wykorzystanie narzędzia z pneumatyczną progresją siły nacisku;
- zrobotyzowanej stacji i technologii obróbki obudowy przekładni ADT z wykorzystaniem narzędzi podatnych;
- zrobotyzowanej stacji i technologii obróbki elementów przekładni FDGS;
- algorytmu pomiarowego realizowanego z wykorzystaniem skanera 2D dla pomiarów wielkości faz i promieni zatępień przekładni ADT;
- algorytmu wyznaczania punktu TCP robota wyposażonego w skaner 2D z wykorzystaniem elementu stożkowego;
- oprogramowania robota wyposażonego w skaner 3D GOM wykorzystanego do weryfikacji jakości obróbki w pracach dotyczących dyfuzora i obudowy przekładni ADT.

Lektura Dysertacji wykazała, że jej Autor posiada zarówno bardzo duże doświadczenie praktyczne jak też wysoką umiejętność wykorzystania narzędzi do programowania robotów, jak również programowania skanerów 2D i 3D. Ponadto wykazał się wiedzą odnośnie implementacji, konstrukcji narzędzi dedykowanych oraz wykorzystania oprogramowania

Maple w realizowanych pracach badawczych. Wskazane umiejętności potwierdzają dobitnie zrealizowane wdrożenia na rzecz pracodawcy.

5. Ocena poziomu redakcyjnego rozprawy

Rozprawa została zredagowana poprawnie, a jej język techniczny i literacki nie budzi istotnych zastrzeżeń. W niektórych jej fragmentach występują niedoskonałości i uchybienia.

Wykazane uchybienia nie są znaczące w odniesieniu do całej treści i objętości rozprawy. Nie wpływają one na ogólną przejrzystość tekstu, czytelność przekazywanych treści, a tym samym na ogólną pozytywną ocenę poziomu merytorycznego rozprawy.

W pracy Autor nie ustrzegł się także błędów językowych i nieprecyzyjnych sformułowań i skrótów myślowych.

Str. 11: Sformułowanie „ponadto prawie kompletny brak informacji o postępach w tej materii pośród naszej konkurencji sprawia, że sami musimy przecierać szlaki” – jest sformułowaniem z języka potocznego.

Str. 13: Zdanie „Wymienione fakty były impulsem zmiany filozofii firmy PWR, która po 2012 r. bardzo mocno rozpoczęła badania możliwości robotyzacji i automatyzacji ...” Firma raczej zintensyfikowała (rozwinęła) badania nad (związane z).

Str. 14: „...algorytm określania punktu charakterystycznego narzędzia, które nie ma materialnej reprezentacji” – o jakie narzędzie chodzi?

Str. 16: „Jedną z zalet zastosowania robotów jest uniwersalność metody” czy to sformułowanie nie jest zbyt dużym skrótem myślowym?

Str. 19 - Dąży się do precyzyjnej kontroli sił, wymaganych do poprawnej realizacji zadanych procesów.

Str. 30: Tabela 4.1 (i kolejne tabele zamieszczone w tekście_ tytuł tabeli powinien być umieszczony nad tabelą, a nie pod nią.

Str. 33: Rysunek 4.6 – brak opisu elementów umieszczonych na rysunku.

Str. 33: „Narzędzia z włóknem o kolorze niebieskim przeznaczone są do obróbki wykończeniowej przedmiotów z twardych metali. A narzędzia z włóknami o kolorze różowym dedykowane są do obróbki przedmiotów z tworzyw sztucznych.” – z punktu widzenia inżyniera to nie kolor narzędzia decyduje o jego zastosowaniu.

Str. 44: Brak opisu oznaczeń zamieszczonych na rysunku 4.29b.

Str. 45: Mało czytelny rysunek 4.30.

Str. 52 - Wartość siły przy danej prędkości dla poprawnej realizacji rozpoczęcia procesu obróbki

Str. 53 - Rys. 4.40 Wykres poprawności obróbki

Dla uzyskanych wyników (Rys. 4.40) dla dwóch poprawnych wartości

Str. 54 - Rys. 4.42. Wykres poprawności obróbki

Dlatego jako parametry do poprawnego rozpoczęcia procesu zatępienia

Str. 55 Zaletą proponowanego rozwiązania jest prostota zapewniająca poprawne wykonanie zatępienia,

Str. 59: Brak legendy - rysunek 4.48 i 4.52

Str. 62: Rys. 4.53 Nie przedstawiono wielkość E_{max}

Str. 67 - 82: Rysunki 4.57 – 4.63 i 4.65 – 4.72 – podpis pod rysunkami „c) wykres błędu siły” – to nie jest błąd siły

Powyższe uwagi jak również znajdujące się w pracy drobne wady redakcyjne nie ujmują wartości merytorycznej rozprawy, szczególnie na tle przedstawianych w rozprawie interesujących i nowatorskich, możliwych do skomercjalizowania, wyników badań naukowo-technicznych.

6. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

W tej części recenzji zawarte są uwagi na które Recenzent oczkuje pisemnego ustosunkowania się przez Doktoranta:

1. W punkcie 4.1.3. rozprawy Doktorant zamieścił szereg rysunków (rys. 4,12; 4.14; 4.16; 4.18, 4.20) na których przedstawione są wyniki z pomiarów wielkości zatępienia dla wybranych narzędzi przy różnych wartościach posuwu. Niestety rysunki te nie są opisane w rozprawie. Proszę o przeprowadzenie analizy otrzymanych wyników, a także przedstawienie wniosków z tej analizy.
2. Na rysunku 4.21 przedstawiono wyniki pomiarów testów wrażliwości procesu dla wybranego narzędzia typu papier ścierny z nasypem z węgliku krzemu. W opisie do rysunku Doktorant napisał: „Z wykonanych testów wynika, że dla poszczególnych punktów różnica przy jednej operacji wynosi 0,02 mm, a w przypadku dwóch operacji 0,05 mm. Otrzymane wyniki wskazują na małą wrażliwość procesu i są zadawalające.” Czy podanie różnicy w wielkości zatępienia jest miarą wystarczającą? Czy nie należałoby przeprowadzić bardziej pogłębionej analizy uwzględniającej nie tylko wielkości bezwzględne ale także analizę błędu otrzymanych wyników.
3. Jak ocenić stwierdzenie (str. 45), że: „Ze względu na to, że ilość usuwanego materiału jest niewielka dlatego narzędzie porusza się z dużą prędkością przy małych siłach kontaktu. Szybkość ruchu punktu TCP narzędzia jest tak duża, że czas odpowiedzi układu jest większy niż wynikająca ze złożonego kształtu konieczność zmian wymuszeń. Ścisłość powietrza powoduje opóźnione reagowanie narzędzia, co w konsekwencji skutkuje tłumieniem szybkich zmian wartości siły zadawanej przez kontroler robota.” Choć w kolejny zdaniu Doktorant stwierdza, że „Fakt ten generuje konieczność doboru parametrów procesu obróbki, czyli określenie strategii realizacji ruchów, wartości ciśnienia powietrza, a tym samym siły kontaktu detal-narzędzie oraz określenie wartości prędkości punktu TCP.”?
4. Na str. 49 Autor podaje „W celu wyboru ze zbioru tych parametrów, które zapewniają możliwie najlepszą realizację procesu zaproponowano procedurę optymalizacyjną. Proszę o przybliżenie tej procedury
5. Na str. 55 przedstawiono wniosek „Otrzymane wyniki prac badawczych pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że najlepsze wyniki stabilizacji szerokości fazy w chwili startu procesu otrzymujemy przy zmianach wartości parametru prędkości rozpoczęcia procesu. Nie jest celowym poszukiwanie możliwości wpływania na wielkość obróbki podczas startu poprzez zmianę wartości siły kontaktu detal-narzędzie. Wniosek ten ma charakter uniwersalny.”- proszę o rozwinięcie tego stwierdzenia

6. W recenzowanej rozprawie Autor nie zaproponował kierunków możliwych do realizacji dalszych prac badawczych ukierunkowanych na autonomizację procesu obróbki mechanicznej elementów silników lotniczych. Proszę o przedstawienie ewentualnych obszarów dalszych badań.

7. Wniosek końcowy

Po analizie treści rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Ornata z Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej nt.: „Synteza narzędzi dedykowanych implementowanych w zrobotyzowanych aplikacjach do obróbki części silników lotniczych”, której promotorem jest dr hab. inż. Andrzej Burghardt, prof. PRz, a promotorem/pomocniczym dr inż. Dariusz Szybicki również z Politechniki Rzeszowskiej w świetle dokonanych i sformułowanych ocen mogę stwierdzić, iż dysertacja:

- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego opracowania i implementacji narzędzi stosowanych w zrobotyzowanym gratowaniu elementów silników lotniczych;
- prezentuje ogólną i ugruntowaną wiedzę teoretyczną mgr. inż. Artura Ornata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a wykazany w dysertacji zakres i sposób prowadzenia eksperymentów, oraz umiejętność analizy otrzymanych wyników wykazują jego wysoką umiejętność do samodzielnego prowadzenia działalności naukowej.

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z opracowaniem innowacyjnych zrobotyzowanej obróbki mechanicznej realizowanej za pomocą najnowocześniejszych obrabiarek sterowanych numerycznie w wielu różnych gałęziach przemysłu.

Pracę oceniam, jako bardzo przydatną szczególnie ze względów praktycznych co jest szczególnie ważne w globalnym wyścigu technologicznym, kiedy w działalności przemysłowej wymaga się szybkiego, efektywnego wdrażania nowoczesnych sposobów obróbki.

Doktorant w prawidłowy i metodyczny sposób przeprowadził proces dowodzenia przyjętego celu rozprawy doktorskiej. Ocenę uzyskiwanych wyników prowadził starannie i obiektywnie. W sposób jednoznaczny wykazał, czego dokonał w trakcie realizacji założonych badań analitycznych i eksperymentalnych. Potrafił wyciągnąć z nich poprawne i logiczne wnioski sformułowane w oparciu o szeroką podbudowę teoretyczną, co potwierdza bogata bibliografia do której trafnie odwołuje się w treści dysertacji.

Na podstawie przedstawionej analizy pozytywnie oceniam recenzowaną rozprawę i stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Ornata pt.: „Synteza narzędzi dedykowanych implementowanych w zrobotyzowanych aplikacjach do obróbki części silników lotniczych”, **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U z 2020 r. poz. 85 ze zm.).

