

Gliwice, 3.04.2023r

dr hab. inż. Sławomir Kciuk, prof. PŚ.  
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej  
Politechnika Śląska

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Artura Ornata

pod tytułem:

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

Podstawa opracowania: Umowa o dzieło na recenzję rozprawy doktorskiej, do której dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

### 1. Ocena aktualności podjętej tematyki i założonego celu rozprawy

W recenzowanej rozprawie przedstawiono interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowania praktyczne problem dotyczący automatyzacji procesów zatępienia ostrych krawędzi detali silników lotniczych.

Postęp technologiczny jaki obserwujemy w obszarze automatyzacji procesów obróbczych, technik pomiarowych oraz sprzętu pomiarowego, wiąże się ściśle z gwałtownym wzrostem innowacyjności w zakresie nowych materiałów, nowych technologii wytwarzania oraz ogólnie metod i narzędzi projektowania. Zapotrzebowanie na wysoką wydajność procesów, dużą precyzję i tempo procesów obróbczych, wysoką jakość i mniejszą liczbę błędów, konkurencyjność cenową, prowadzi do powstawania coraz bardziej złożonych i zaawansowanych systemów do automatyzacji produkcji nawet w przypadku produkcji mało seryjnej czy tak odpowiedzialnej jak produkcja komponentów/podzespołów pasażerskich statków powietrznych.

Zintegrowane metody projektowania, z zastosowaniem najnowszych osiągnięć inżynierii materiałowej, wsparte badaniami doświadczalnym i symulacjami numerycznymi, są dzisiaj standardową praktyką idącą ramię w ramię z automatyzacją m.in. obróbki mechanicznej komponentów silników lotniczych. Takie podejście do wytwarzania z wykorzystaniem dobrze zaprojektowanej automatyzacji przynosi zarówno korzyści wynikające z ochroną zdrowia

ludzkiego ale również wymierne korzyści ekonomiczne, które stosunkowo szybko rekompensują poniesione na inwestycje nakłady. Trudno jednakże wskazać najważniejsze zalety automatyzacji, jak wskazano w niniejszej dysertacji, każdy proces jest inny i należy traktować go indywidualnie.

W związku z rozważanymi w pracy zagadnieniami, szeroko opisano problematykę automatyzacji procesu zatępienia ostrych krawędzi komponentów silników lotniczych. Autor, opisał procesy produkcyjne, w których wytwarzając wybrane komponenty silników lotniczych stosuje się frezowanie i toczenie. Immanentną częścią opisywanych procesów obróbki mechanicznej jest powstający grat, który należy usunąć w kolejnych procesach obróbczych. Ważnym aspektem jest zatem wykorzystanie efektu synergii różnych metod badawczych, metod wytwórczych, w tym syntezy narzędzi dedykowanych implementowanych w zrobotyzowanych procesach obróbczych, do uzyskania optymalnych cech technologicznych i eksploatacyjnych detali silników lotniczych.

Rozpatrywane w rozprawie problemy, jak już wspomniano, dotyczą usuwania zadziorów, tak aby ostateczny kształt i powierzchnia komponentu były optymalne. Klasycznym sposobem na usunięcie gratu jest wygładzenie, usunięcie zadziorów i nierówności poprzez fazowanie, zaokrąglenie ostrych krawędzi lub szlifowanie. Czynności te wykonywane są w ramach obróbki ściernej ręcznej lub mechanicznej. Gratowanie ręczne jest mało skuteczną metodą i stosuje się np. do komponentów o złożonym kształcie. Operacje te są czasochłonne, a dokładność ich wykonania uzależniona jest od doświadczenia pracownika. W przypadku zadziorów w otworach mogą być stosowane różne techniki obróbki skrawaniem, w tym na obrabiarkach CNC lub za pomocą wieloosiowych robotów przemysłowych charakteryzujących się wysoką dokładnością operowania (ruchu po zadanej trajektorii) w przestrzeni roboczej. Ponadto, użycie robota umożliwi realizację procesu obróbki adaptacyjnej - w kontroli: siły docisku, prędkości i przyspieszenia narzędzia, co również jest przedmiotem rozważań w ramach niniejszej dysertacji.

Opisywane i rozwiązywane zagadnienia są specyficzne, ponieważ towarzyszą procesom wytwórczym w przemyśle lotniczym, gdzie zapewnienie wysokiej jakości wytwarzania bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo uczestników lotu raz długi czas bezawaryjnej eksploatacji silnika.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, utylitarnym jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce.

Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna.

## **2. Przegląd treści pracy**

Recenzowana praca została napisana na 166 stronach maszynopisu formatu A4; składa się z 9 rozdziałów oraz bibliografii, w skład której wchodzi 119 pozycji literaturowych.

W rozdziale pierwszym zawarto treści opisujące historię oraz profil działalności firmy Pratt & Whitney Rzeszów S.A. (PWR). Wskazano również na wytwarzane komponenty będące przedmiotem analiz w niniejszej dysertacji, tj: dyfuzor silnika V2500, przekładnia ADT, przekładnia FDGS.

W drugim rozdziale, Autor opisał genezę problemu badawczego oraz cel pracy. Zdefiniowany cel, postawiony problem badawczy oraz zakres pracy są spójne. Rozdział trzeci dotyczy analizy stanu wiedzy na temat inżynierii materiałowej w odniesieniu do materiałów z których wykonywane są komponenty silników lotniczych, metod obróbki mechanicznej, w tym zautomatyzowanych stanowisk obróbczych z wykorzystaniem wieloosiowych robotów, systemów sterowania robotami, systemów pomiarowych a na wirtualnej rzeczywistości w zastosowaniach będących przedmiotem niniejszych rozważań kończąc.

W kolejnym, czwartym rozdziale, określono przydatność narzędzi zrobotyzowanych do obróbki komponentów silników lotniczych. Na przykładzie obróbki korpusu przekładni ADT przedstawiono prace badawcze dotyczące doboru parametrów procesu obróbki i rodzaju narzędzi pasywnych, wyznaczenia parametrów procesu dla fazowania krawędzi dyfuzora silnika V2500, analizy układu kontroli siły, który współpracuje z narzędziami dostępnymi na polskim rynku oraz narzędziami dedykowanymi. Badania prowadzono z wykorzystaniem szeregu środowisk, komputerowych narzędzi inżynierskich do wspomagania szeroko pojętego modelowania i diagnozowania obróbki mechanicznej. W rozdziale piątym, dość skąpo opisano spostrzeżenia (praktyczne) użytkownika środowisk numerycznych do monitorowania pracy stacji zrobotyzowanych.

Rozdział szósty zawiera informację o systemach pomiarowych wykorzystanych do badań doświadczalnych. Autor opisał m.in. opracowany autorski algorytm określania punktu charakterystycznego narzędzia, które nie ma materialnej reprezentacji za pomocą laserowego układu pomiarowego.

Sposób wyznaczania punktu TCP skanera 2D, wraz z metodykami badawczymi i weryfikacją poprawności działania przedstawiono w rozdziale siódmym.

W kolejnym, ósmym rozdziale, zawarto opisy trzech wdrożeń opracowanych narzędzi i systemów zrobotyzowanych do produkcji: dyfuzora silnika V2500, korpusu przekładni ADT oraz kół zębatach przekładni FDGS.

W ostatnim rozdziale zawarto podsumowanie oraz kierunki dalszych badań.

Spis literatury uwzględnia szereg prac z zakresu omawianej tematyki badawczej, w tym wiele prac o podstawowym znaczeniu dla rozważanego problemu, zawiera również dwie współautorskie publikacje Doktoranta.

### 3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Podjęte przez Autora wyzwanie opracowania skutecznej, ilościowo i jakościowo, metody syntezy narzędzi dedykowanych implementowanych w zrobotyzowanych aplikacjach do obróbki części silników lotniczych, wymaga nowoczesnego podejście do zagadnienia.

Rozważania teoretyczne oraz zaproponowana metodyka syntezy wybranej klasy narzędzi do obróbki komponentów wybranej klasy silników lotniczych jest znaczącym osiągnięciem naukowym autora. Tematyka recenzowanej monografii mieści się w nurcie prac o znaczeniu zarówno praktycznym, jak i teoretycznym, dotyczy bowiem istotnych zagadnień z punktu widzenia obróbki mechanicznej oraz uzyskiwania optymalnych parametrów eksploatacyjnych i jakościowych wytwarzanych komponentów.

Przedstawiona kompozycja pracy jest właściwa, treść rozdziałów spójna a ich kolejność logiczna. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od podstawowych, prostych zagadnień do złożonych. Taki układ treści powoduje, że zagadnienia prezentowane w pracy przedstawione są w sposób przejrzysty i konsekwentny.

Rozprawa napisana jest jasnym, poprawnym językiem.

Na wyróżnienie zasługują cytowana i omawiana bibliografia. Jej dobór przekonuje mnie, iż autor prawidłowo porusza się w prezentowanym, w rozprawie zagadnieniu. Dobór rysunków i wykresów uważam za właściwy.

Autor wykazał się dobrym rozeznaniem w poruszanych zagadnieniach naukowych.

Prowadzone badania doświadczalne oraz opracowane metodyki badawcze wskazują na wyjątkową dojrzałość badawczą, sprawność w organizacji warsztatu badawczego oraz umiejętność syntetycznego opisywania problemu badawczego, analizy i wnioskowania. Warto tu zwrócić uwagę na wielorakość stosowanych narzędzi i metod badawczych, których właściwe używanie wymaga solidnej podbudowy teoretycznej i doświadczenia.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury w tym analizy rynku, w której wykazano brak gotowych rozwiązań w zakresie obróbki mechanicznej komponentów silników lotniczych przy użyciu zrobotyzowanych automatycznych stacji zrobotyzowanych, opracowano technologie zautomatyzowanego gratowania (kompleksowe rozwiązanie) wybranych komponentów silników lotniczych.

Niewątpliwie oryginalnym osiągnięciem jest autorska konfiguracja zrobotyzowanego stanowiska dedykowanego do obróbki elementów przekładni silnika lotniczego, jest szczególnie cennym rozwiązaniem ze względu na detale odlewane, gdzie mamy do czynienia z tzw. nieokreślonością kształtu i położenia krawędzi obrabianych, spowodowane m.in. skurczami odlewniczymi. Użycie maszyny CNC do obróbki tej grupy detali (operacje zatępienia krawędzi) jest bardzo skomplikowane i kosztowne ze względu na cenne oprzyrządowanie, takie jak sondy skanujące typu Renishaw „Sprint”. Opracowana technologia przy użyciu robota przemysłowego jest alternatywą dla obróbki ręcznej w tym zakresie, przynosząc konkretne wymierne korzyści: redukcja czasu obróbki o ponad 50 %, zdecydowana poprawa powtarzalności i stabilności obróbki mechanicznej. Ponadto, zautomatyzowany

proces obróbki w zamkniętej przestrzeni redukuje do minimum udział operatora w niebezpiecznej strefie.

Wysyntezowano oraz opracowano postać szeregu narzędzi obróbczych, klasyfikując je w trzech grupach: narzędzia pasywne, narzędzia pneumatyczne z założoną zmiennością siły nacisku oraz narzędzia z układem kontroli siły oddziaływania. Dla wszystkich grup narzędzi przeprowadzono badania weryfikacyjne, określono parametry obróbki zapewniające optymalne wymagania kształtowo-wymiarowe. Określono suboptymalne parametry obrabianych powierzchni. W przypadku narzędzi ze zmienną siłą docisku, uwzględniając stabilność procesu opracowano procedurę doboru parametrów dla obszaru pierwszego kontaktu narzędzia z obrabianym materiałem. Przeprowadzono szereg badań doświadczalnych – walidacyjnych mających na celu dobór parametrów systemu zrobotyzowanego z układem kontroli siły FC, biorąc pod uwagę dwa główne parametry procesu: współczynnik zmiany siły FC oraz współczynnik tłumienia D. Uzyskane wielkości zatępienia, wg. przyjętych wskaźników są bliskie powtarzalności zautomatyzowanego robotycznego stanowiska obróbczego.

W szczególności, do oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie zrobotyzowanego systemu i technologii obróbki dyfuzora silnika V2500 zbudowanego z robota, z kontrolą siły, realizacji ścieżek w ruchach zależnych (multimove), wykorzystanie narzędzia z pneumatyczną progresją siły nacisku,
- opracowanie stacji zrobotyzowanej i technologii obróbki komponentów przekładni FDGS,
- opracowanie stacji zrobotyzowanej i technologii obróbki obudowy przekładni ADT oraz narzędzi podatnych,
- opracowanie systemu pomiarowego i metodyk badawczych z wykorzystaniem skanera 2D do pomiarów wielkości faz i promieni zatępień obudowy przekładni ADT,
- opracowanie algorytmu wyznaczania punktu TCP robota,
- opracowanie algorytmu weryfikacji jakości obróbki dyfuzora silnika i obudowy przekładni ADT przy użyciu robota i skanera typu 3D.

Ponadto, Autor wykazał się umiejętnościami w zakresie programowania programowania wybranej klasy robotów oraz programowania wybranych typów skanerów 2D i skanerów 3D.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne. Wszystkie wymienione powyżej zagadnienia i związane z nimi elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne:

1. W pracy zabrakło zbiorczego, spójnego przedstawienia narzędzi w odniesieniu do wybranego procesu obróbki lub w odniesieniu do obrabianego komponentu,
2. Dlaczego zrezygnowano z postawienia w pracy tezy, pomimo iż Autor wspomina parametrach typu skrócenie czasu obróbki, powtarzalność, itp.?

Podczas lektury dysertacji, zauważono kilka błędów redakcyjnych, które zostaną przekazane bezpośrednio do Autora.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania należy ocenić wysoko ze względu na:

- prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań,
- rzeczowy sposób prezentacji wyników,
- sumienność wykonania poszczególnych etapów pracy zwłaszcza pod kątem formalnym i matematycznym,
- wykazane przez Autora dobre rozeznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym umiejętności praktyczne,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków w przyszłości.

#### 4. Ocena końcowa

Oceniając przedstawioną rozprawę doktorską należy podkreślić aktualność jej tematyki z punktu widzenia potrzeb obróbki mechanicznej wybranych komponentów określonego typu silników lotniczych. Recenzowana rozprawa zawiera elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Uważam, że opiniowaną pracę Pana mgr inż. Artura Ornata cechuje interdyscyplinarne podejście do zagadnień analizy zjawisk zachodzących podczas obróbki mechanicznej, co stanowi stosowny wkład w zakresie analizy i kształtowania cech technologicznych, eksploatacyjnych i jakościowych wybranej klasy obiektów technicznych. Opracowana metoda syntezy narzędzi dedykowanych implementowanych w zrobotyzowanych aplikacjach do obróbki części silników lotniczych jak również sposób realizacji badań opisanych w niniejszej dysertacji świadczą o odpowiednim przygotowaniu doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest wartościowym pod względem merytorycznym opracowaniem naukowym wykazującym znaczący wkład Autora w rozwiązanie rozważanych w niej zagadnień. Wymienione w niniejszej recenzji uwagi oraz zauważone usterki nie zmieniają mojej bardzo pozytywnej opinii o pracy.

Ponadto, w mojej opinii, niniejsza dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych Pana mgr. inż. Artura Ornata w sferze gospodarczej.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie przewodu doktorskiego, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku, z późniejszymi zmianami, o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę, iż wyniki własnych badań naukowych Pana mgr. inż. Artura Ornata wywodzące się z realnych potrzeb przemysłu lotniczego, znalazły zastosowanie w sferze gospodarczej, w postaci trzech wdrożeń w firmie Pratt & Whitney Rzeszów S.A., generując wymierne korzyści ekonomiczne i jakościowe oraz istotny wkład Autora niniejszej dysertacji w rozwój szeroko pojętej robotyzacji wybranych procesów produkcyjnych w przemyśle lotniczym, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej dysertacji.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'K. S.', is positioned to the right of the main text block.