

dr hab. inż. Piotr Małka, prof. PK
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Infotroniki i Cyberbezpieczeństwa E-3
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Kraków, 08.02.2026 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Karola Falandysa

pt. „Wielokryterialna optymalizacja procesu szczotkowania zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz

Promotor pomocniczy: dr inż. Jacek Tutak

1. Wybór tematu, cel i zakres pracy

Recenzowana praca została napisana w języku polskim i obejmuje zagadnienia związane z badaniami nad wielokryterialną optymalizacją procesu szczotkowania zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A. Praca ma charakter badawczo-naukowy, zawiera i skupia się na optymalizacji parametrów procesu gratowania ostrych krawędzi podczas produkcji łopatek turbiny niskiego ciśnienia.

Celem recenzowanej pracy było wydłużenie żywotności narzędzi obróbczych przy zachowaniu wysokiej jakości detali, ma to kluczowe znaczenie zwłaszcza w przemyśle lotniczym. Autor w dysertacji zwrócił szczególną uwagę na możliwość optymalizacji kosztów produkcji w sposób odpowiedzialny, przynoszący korzyści ekonomiczne, ekologiczne i społeczne. Przeprowadzone badania wykazały istnienie lokalnego minimum zużycia materiałów ściernych, które umożliwia zwiększenie liczby obrabianych części z wykorzystaniem jednego narzędzia. Dodatkowym aspektem rozprawy jest mocne zaakcentowanie konieczności dalszych badań nad zmianą materiałów oraz parametrów narzędzi w celu pogłębienia optymalizacji. Autor w ramach pracy i badań zbudował model numeryczny procesu gratowania, który pozwolił skrócić czas i ograniczyć koszty przeprowadzonych badań. Doktorant szeroko przedstawił i przeanalizował uzyskane wyniki badań, które stanowią bardzo duży wkład w optymalizację zużycia narzędzi obróbczych. Wyniki potwierdzają poprawność przeprowadzonych badań i wskazują na

dalszą optymalizację uzyskanych wyników. Praca stanowi także solidną bazę do przyszłych badań naukowych i wdrożeń przemysłowych. Wprowadzenie nowych rozwiązań technicznych i technologicznych wspiera zrównoważony rozwój firmy, łącząc korzyści ekologiczne z finansowymi.

Niniejsza praca obejmuje swoim zakresem koncepcję i dobór metod badawczych, planowanie i organizację eksperymentu, przedstawienie uzyskanych wyników, ich dyskusję oraz sformułowanie wniosków.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów opisujących poszczególne obszary teoretyczne i badacze pracy.

W pierwszym rozdziale pracy autor przeanalizował i scharakteryzował dostępne rozwiązania i metodologie badań. Wykonał dogłębną analizę dostępnej literatury wraz z przedstawieniem istniejących i stosowanych w przemyśle rozwiązań pod kątem optymalizacji różnych operacji technologicznych. Doktorant na podstawie przeanalizowanej literatury stwierdził, iż autorzy przeprowadzali optymalizację różnych operacji technologicznych wykorzystując w swoich badaniach stale, stopy aluminium czy materiały kompozytowe. Cechą wspólną przeprowadzonych prac była ich realizacja z wykorzystaniem maszyn CNC, które zapewniają właściwą powtarzalność dla poszczególnych prób realizowanych w ramach testów. W przeanalizowanych pracach badacze wykorzystywali różne metodologie mając za cel dążenie do wyznaczenia takich parametrów, które przyczynią się do redukcji kosztów operacyjnych poprzez ograniczenie wykorzystywanej w procesie produkcyjnym energii oraz na wydłużenie okresu wykorzystania narzędzi czy też ograniczenie czasu trwania operacji produkcyjnej. W przeanalizowanych publikacjach zawsze wykazywane były różnice pomiędzy teoretycznie uzyskiwanymi rozwiązaniami, a wynikami eksperymentalnymi. W licznych artykułach podkreślano także zalety wynikające z przeprowadzanych prac optymalizacyjnych. Doktorant w niniejszym rozdziale przedstawił i udowodnił, że wiele zespołów badawczych zajmuje się tą tematyką i głównie ukierunkowane były te badania na redukcję kosztów finansowych (ograniczenie zużycia materiałów i narzędzi oraz podniesienie efektywności energetycznej maszyn) dodatkowo działania prospołeczne i ekologiczne takie jak ograniczenie śladu węglowego. W rozdziale tym autor zawarł także cel oraz zakres pracy, jakim będzie zajmował się w dysertacji jak również postawił tezę pracy, którą udowadnia w kolejnych rozdziałach pracy.

Drugi rozdział to opis testów laboratoryjnych, jakie zaplanował i wykonał autor rozprawy w ramach prac badawczych. Do tego celu doktorant zaprojektował i przygotował stanowisko laboratoryjne, które umożliwiło poznanie poziomu oraz zakres zmienności sił i momentów występujących w trakcie realizacji procesu gratowania. W trakcie testów autor zmieniał zestaw parametrów wejściowych takich jak prędkość obrotowa, czas trwania procesu czy też głębokość dosunięcia detalu do narzędzia. W ramach testów przeprowadzono, także kontrolę wybranych parametrów technologicznego koniecznych do poznania rezultatów procesu oraz oceny poprawności przeprowadzonej operacji jak również zarejestrowania obciążeń występujących w trakcie procesu. Zaprojektowane i przygotowywane stanowisko cechowało się:

- powtarzalną możliwością realizacji procesu gratowania dla serii łopatek;
- możliwością modyfikowania wybranych parametrów takich jak czas trwania operacji, prędkość obrotowa narzędzia, głębokość dosunięcia narzędzia do obrabianego detalu;
- kontrolą oraz rejestracją sił i momentów występujących w trakcie realizacji procesu gratowania;
- kontrolą rezultatów procesu z punktu widzenia przyszłych działań wdrożeniowych, interesujące są tylko te próby w których proces gratowania przełożył się na realizację w sposób poprawny.

Autor dysertacji zbudował stanowisko laboratoryjne składające się z robota przemysłowego ABB IRB 2400, kontrolera ABB IRC5, Czujnika Force Control, szlifierki przemysłowej oraz układu pomiarowego - Profilometr laserowy Keyence LJ-V7060. Przygotowane w ten sposób stanowisko testowe umożliwiło doktorantowi przeprowadzenie operacji gratowania w środowisku laboratoryjnym, poznanie wartości i zakresu zmienności sił oraz momentów występujących podczas procesu, a także zbadanie wpływu wybranych parametrów procesu na wspomniane zmienne.

Kolejnym elementem tego rozdziału było zidentyfikowanie istotnych parametrów procesu. Przed rozpoczęciem testów przeprowadzono analizę procesu gratowania i urządzeń wchodzących w skład stanowiska. Umożliwiło to autorowi zdefiniowanie parametrów mających wpływ na poprawny przebieg procesu oraz zidentyfikowano parametry określające bezpośrednio wynik procesu. W rozdziale doktorant dobrał także tarczę szczotki, która wykonana została ze stali konstrukcyjnej. Materiał z jakiego wykonano włosie dobrane narzędzia to węgiel krzemu (SiC) znany pod handlową nazwą jako ABRALON612.

W ramach rozdziału autor dysertacji przeprowadził testy pomiarowe dzięki którym stwierdził, że wybrane kluczowe parametry procesu gratowania mają inny niż zakładano wpływ na wartości obciążeń. W przypadku prędkości obrotowej narzędzia jest to liniowy wpływ, tzn. wzrost prędkości obrotowej przekłada się wprost na zwiększenie obciążeń. Natomiast zmiana głębokości wsunięcia obrabianej części w szczotkę powoduje nieliniowy wzrost obciążeń. Autor rozprawy wykazał, że zużycie szczotki prowadzi do spadku wartości momentu generowanego przez wirujące narzędzie. Wnioskiem doktoranta była konieczność przeprowadzenie dalszych prac mających na celu ustalenie takiego zestawu parametrów procesu jak prędkość obrotowa i głębokość dosunięcia detalu do narzędzia. Dobór takich parametry zdaniem autora przełoży się na wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia.

Kolejny rozdział to testy przeprowadzone w środowisku przemysłowym, które miały na celu wyznaczenie w sposób obiektywny i jednoznaczny optymalnych, pod kątem ograniczenia zużycia narzędzia, parametrów procesu technologicznego. Zadaniem jakie postawił sobie doktorant to dostarczenie wyników, które po dalszych obliczeniach matematycznych pozwolą na zbudowanie równania matematycznego, które powiąże wybrane parametry procesu szczotkowania z grubością włosa szczotki i jego zużycia. Następnie z wykorzystaniem metod analizy matematycznej wyznaczone zostanie lokalne minimum przekładające się na ograniczenie zużywania narzędzi przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej jakości krawędzi poddanych procesowi gratowania. W celu przeprowadzenia testów w środowisku przemysłowym zdefiniowano parametry wejściowe, jakie będą modyfikowane oraz parametry wyjściowe, jakie będą rezultatem przeprowadzonej operacji produkcyjnej. Na podstawie przeprowadzonych testów wstępnych do parametrów wejściowych autor zakwalifikował prędkość obrotową szczotki. Zmiana prędkości obrotowej narzędzia przekładała się na zmianę momentu pomiędzy wirującą szczotką a obrabianym detalem. Z obserwacji i pomiarów wynika, że zależność ta cechowała się liniowym wzrostem momentu w zależności od wzrostu prędkości obrotowej. Bazując na testach wykonanych przez doktoranta opisanych w rozdziale drugim zdecydowano się również uwzględnić wielkość zagłębienia obrabianego detalu w narzędzie. Zależność ta cechowała się nieliniowym charakterem dla wyższych prędkości obrotowych oraz zbliżonym do liniowego wzrostem momentu w zależności od przyrostu głębokości dosunięcia. Zgodnie z wnioskami jakie autor pozyskał podczas realizacji prowadzonych badań konieczne stało się powiązanie grubości włosa z liczbą sztuk obrobionych za pomocą szczotki. Będzie to ostatni z parametrów wejściowych użyty do optymalizacji wykorzystania narzędzia.

Doktorant zrealizował w ramach prac szereg testów i pomiarów zużycia i grubości włosa w celu wyznaczenia równania wiążącego parametry wejściowe z grubością włosa szczotki. W rozdziale przedstawiono wyprowadzenie równania wraz z obliczeniami i wzorami jakie powiązane były z uzyskaniem końcowego rozwiązania. Przedstawienie graficznego rozwiązania równania przedstawia rysunek 15.

Przeprowadzone testy w środowisku przemysłowym potwierdziły, że zadziory zostały całkowicie usunięte. Świadczy to o poprawności procesu szczotkowania. Drugim parametrem wyjściowym dla procesu szczotkowania jest promień zatępienia krawędzi. W przypadku tego parametru autor zdecydował się na dokonanie kontroli wyrywkowej, tzn. dla losowo wybranych sztuk dokonano pomiarów promienia załamania krawędzi. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przyjętej metodologii i technologii. Uzyskane w testach wartości promienia załamania krawędzi, mieszczące się w przedziale 0.10 do 0.40 mm uznano za poprawne, z punktu widzenia wymogów projektowych szczotkowanych detali. Autor rozprawy w celu wizualizacji zebranych danych podczas wszystkich prób testowych, przygotował wykres (Rys. 19) obrazujący tempo zużywania się narzędzia w zależności od prędkości obrotowej oraz dosuwu (średnicy szczotki). Rysunek pokazuje, że włosie szczotki zostało najmniej zużyte, analizując okres pracy 30 jak i 60 sztuk, dla następującego zestawu parametrów: prędkość obrotowa 1400 rpm oraz średnica szczotki 200 mm.

Rozdział czwarty to symulacja procesu szczotkowania wykonana z wykorzystaniem MES (metody elementów skończonych). W celu weryfikacji wpływu parametrów technologicznych na długość eksploatacji narzędzia autor zdecydował się przygotować model numeryczny w oparciu o metodę elementów skończonych w środowisku Ansys Workbench Mechanical. Zaobserwowane różnice dla pomiarów dotyczących szczotek, które przepracowały 30 sztuk wynoszą od 39 do 46%. Zaobserwowane różnice dla pomiarów dotyczących szczotek, które przepracowały 60 sztuk wynoszą od 3 do 10%. Autor wysunął wniosek, iż sam proces ścierania się materiału w zależności od czasu ma charakter nieliniowy, natomiast różnice te spadają wraz z wydłużeniem się analizowanego okresu. Różnice wahające się od 3% do 10% rozbieżności pomiędzy testem, a modelem numerycznym przyjęto za poprawne i akceptowalne.

W rozdziale piątym doktorant przeprowadził wdrożenie i weryfikację nowych parametrów procesu jakie uzyskane zostały w ramach realizacji prac badawczych. Autor rozprawy zdecydował się na wdrożenie opracowanego zestawu parametrów mającego na celu wydłużenie okresu eksploatacji szczotek wykorzystywanych w procesie. Celem realizacji procesu szczotkowania było zapewnienie odpowiedniej jakości obrabianych powierzchni oraz

krawędzi. Podstawowym zadaniem koniecznym do realizacji w ramach operacji gratowania jest usunięcie wszelkich zadziorów powstałych na wcześniejszym etapie produkcji komponentów. Drugim równie istotnym zadaniem realizowanym w ramach operacji szczotkowania jest uzyskanie odpowiedniego stanu krawędzi zewnętrznych produkowanych detali. Wszystkie założenia projektowe jakie postawił sobie doktorant stawiane operacji szczotkowania polegające na całkowitym usunięciu wszystkich zadziorów oraz otrzymaniu odpowiedniego promienia zatępienia krawędzi zostały zrealizowane dla wszystkich produkowanych części. Udowodnione zostało, że optymalizacja czasu eksploatacji narzędzia została przeprowadzona w sposób prawidłowy. Czas eksploatacji szczotki uległ znacznemu wydłużeniu z wartości początkowej około 60 sztuk na narzędzie, do wartości około 100 sztuk na narzędzie a proces gratowania realizowany został w sposób poprawny i akceptowalny.

Szósty rozdział przedstawia analizę kosztów procesu szczotkowania. Doktorant pokazał potrzebę optymalizacji kosztów procesów produkcyjnych, w tym operacji szczotkowania. Obecnie koszty materiałowe, energetyczne i robocizny stale rosną, co zmusza przedsiębiorstwa do poszukiwania efektywniejszych metod realizacji procesów. Współczesne podejścia, takie jak Lean Manufacturing czy Przemysł 4.0, kładą nacisk na eliminację marnotrawstwa i zwiększenie efektywności, co obejmuje również precyzyjne zarządzanie kosztami jednostkowych operacji technologicznych. Dodatkowo analiza kosztów pozwala nie tylko na redukcję wydatków, ale także na lepsze planowanie produkcji, co jest szczególnie istotne w kontekście dynamicznie zmieniających się zamówień i wymagań rynkowych. Autor w tym rozdziale dokonał analiza kosztów procesu technologicznego operacji szczotkowania w kontekście kompleksowego podejścia do szacowania i minimalizacji wydatków produkcyjnych. Szeroko opisał ramy teoretyczne i znaczenie optymalizacji kosztów, odniósł się do publikacji naukowych, omówił metody analizy kosztów wraz z równaniami matematycznymi, które uwzględniają kluczowe składowe kosztów produkcyjnych. Takie podejście pozwoliło na utworzenie podstaw do wykazania wpływu wprowadzonych zmian na efektywność ekonomiczną operacji szczotkowania. Doktorant dzięki pracom optymalizacyjnym, a w szczególności pracom związanym z wydłużeniem okresu eksploatacji narzędzia, doprowadził do znacznej redukcji kosztów jednostkowych operacji szczotkowania. Udowodnił, że w dłuższej perspektywie pozwoli to firmie na utrzymanie przewagi konkurencyjnej, niezbędnej do utrzymania pozycji lidera w branży. Z kolei ograniczenie śladu węglowego poprzez ograniczenie zapotrzebowania na energię elektryczną, niezbędną do realizacji procesu gratowania, ograniczy ślad węglowy powstały w ramach procesu produkcji łopatek do turbiny niskiego ciśnienia.



Rozdział siódmy to wnioski końcowe i przedstawienie kierunków dalszych badań i prac związanych z tematem rozprawy. Autor dysertacji w ramach prowadzonych badań wyznaczył zestaw parametrów technologicznych dla operacji gratowania oraz wprowadzenia tychże parametrów w środowisku produkcyjnym, mając na celu optymalizację procesów produkcyjnych oraz redukcję wpływu na środowisko naturalne i poprawę efektywności finansowej przedsiębiorstwa. Otrzymane wyniki autor zweryfikował przy użyciu obliczeń numerycznych, pozwoliło to na dokładną analizę i ocenę skuteczności wprowadzonych parametrów technologicznych. Wyniki badań jakie uzyskał doktorant potwierdzają zasadność wprowadzenia nowych parametrów technologicznych i wskazują na ich znaczący wpływ na poprawę efektywności produkcyjnej oraz redukcję negatywnego wpływu na środowisko a przede wszystkim obniżają koszty operacyjne. Dalsze kierunki badań jakie wskazał autor to konieczność eksperymentowania ze zmianą materiału narzędzia oraz jego parametrów, może prowadzić do dalszej optymalizacji procesów produkcyjnych. Zmiana materiału narzędzia przyczynić się może według autora do zwiększenia jego trwałości, redukcji kosztów eksploatacyjnych oraz poprawy jakości końcowych produktów. Dalsze badania powinny również uwzględniać różnorodne warunki operacyjne i specyfikacje produkcyjne, aby uzyskać bardziej wszechstronne wyniki i lepiej zrozumieć wpływ nowych parametrów technologicznych na różne aspekty produkcji. Zastosowanie nowoczesnych technologii, takich jak sztuczna inteligencja i analiza danych, może dodatkowo wspomóc proces optymalizacji i wdrażania innowacyjnych rozwiązań.

Nowatorstwo i oryginalność pracy mgr inż. Karola Falandysa to wyznaczenia nowego zestawu parametrów technologicznych dla operacji gratowania oraz wprowadzenia parametrów w środowisku produkcyjnym, mając na celu optymalizację procesów produkcyjnych oraz redukcję wpływu na środowisko naturalne i poprawę efektywności finansowej przedsiębiorstwa. Przeprowadzone badania oparł na analizie prac badawczych zrealizowanych na Politechnice Rzeszowskiej, które polegały na przygotowaniu zautomatyzowanego stanowiska roboczego mającego za zadanie realizować proces zatępiania krawędzi. Przeprowadzone prace wykazały, że parametry technologiczne definiujące operacje szcztokowania takie jak prędkość obrotowa narzędzia czy też głębokość dosunięcia detalu do szcztoki w sposób istotny zmieniają wartość obciążeń powstałych w trakcie realizacji operacji gratowania. Przekłada się to bezpośrednio na obniżenie kosztów operacyjnych firm w których ten proces jest istotnym elementem działalności. Doktorant poprzez weryfikację empiryczną

udowodnionął, że modyfikacja parametrów technologicznych prowadzi do znacznej redukcji zużycia narzędzi. Wykazano w oparciu o przygotowany model matematyczny, iż ilość detali opracowanych z użyciem tego samego narzędzia może wzrosnąć z wartości ok 60 sztuk do wartości ok 100 sztuk co istotnie ogranicza koszt materiałów ściernych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi jakie nasuwają się po przeczytaniu pracy mają charakter **ogólny i redakcyjny**. Zaznaczyć należy, że dysertacja jest bardzo starannie przygotowana i zawiera jedynie kilka różnorodnych usterek redakcyjnych oraz edytorskich. Zarówno te wymienione jak i inne redakcyjne usterki nie umniejszają merytorycznej i naukowej wartości pracy. Poniżej zamieszczono uwagi do recenzowanej pracy:

- 1) Sporadycznie znaleźć można zbędne lub wstawione w błędnym miejscu znaki interpunkcyjne, co może powodować kłopoty w poprawnej interpretacji tekstu.
- 2) Wykresy i rysunki zawarte w pracy, zwłaszcza w rozdziale trzecim i piątym (rys. 16 rys. 36, do rys. 41) zdecydowanie powinny być większe. Poprawiłoby to czytelność i interpretację otrzymanych wyników jak również estetykę pracy.
- 3) Stosowanie słów „z zadawalającą powtarzalnością” w przypadku prac inżynierskich jest znaczącym niedopatrzeniem i błędem.
- 4) W rozdziale 4 Autor odnosi się do rysunku 4 oraz rysunku 20, dla czytelności i interpretacji rysunek 4 powinien być powtórzony w tym rozdziale. Bardzo dobrym efektem interpretacji byłoby nałożenie na siebie tych rysunków i zrobienie i zaznaczenie różnic.
- 5) W tabeli 15 Autor podał stałe materiałowe wykorzystane w modelu matematycznym, brak informacji co to za materiał i skąd autor pozyskał te dane.
- 6) W rozdziale 4 punkt 4.1 Doktorant zawarł wyniki symulacji, brak odpowiedniej interpretacji uzyskanych wyników i co z nich wynika. Zwłaszcza dotyczy to analizy ilości startego materiału w zależności od czasu trwania procesu ...?
- 7) Autor w punkcie 4.3 wykazał różnice wahające się od 3% do 10% za poprawne. Na jakiej podstawie uznane zostały za poprawne i dlaczego?



4. Podsumowanie

Omawiana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań i świadczy o tym, że Autor potrafi postawić zagadnienie i rozwiązać je na drodze teoretycznej, numerycznej oraz zweryfikować doświadczalnie, a rezultaty badań zanalizować i wyciągnąć poprawne wnioski. Wywody doktoranta są jasne a wyniki dysertacji mogą być użyteczne z naukowego jak i technicznego punktu widzenia. Na szczególną uwagę zasługuje aplikacyjny charakter pracy. Uzyskane wyniki bezpośrednio wpływają na obniżenie kosztów operacyjnych firm zwłaszcza z branży lotniczej. Implementacja wyników w bardzo szybki i stosunkowo prosty sposób może być zastosowane w przemyśle.

Biorąc pod uwagę całość pracy należy stwierdzić, iż autor rozwiązał istotny problem nowoczesnej tematyki naukowej w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Karola Falandysa spełnia warunki określone w aktualnie obowiązującej ustawie z dnia 14 marca 2003 r o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i na tej podstawie stawiam wniosek o dopuszczenie przedmiotowej pracy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej.

Prof. Marek