



Politechnika
Śląska



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA EDUKACYJNOBADAWCZA

Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Dr hab. inż.
Sławomir Duda, prof. PŚ
Kierownik Katedry

l.dz.

Gliwice, 18.02.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Karola Falandysa

pod tytułem:

**„Wielokryterialna optymalizacja procesu szczotkowania zamka łopatk
turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A”**

podstawa opracowania: pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady
Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego
Łukasiewicza prof. dr hab. inż. Andrzeja Kawalca nr RM-530-06-01/2025 z
dnia 26.11.2025 r., do którego dołączono egzemplarz pracy doktorskiej.

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Kurc, prof. PRz., a
promotorem pomocniczym dr inż. Jacek Tutak.

Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

ul. Konarskiego 18a, pok. 161, 44-100 Gliwice
+48 32 237 13 86
slawomir.duda@polsl.pl

NIP 631 020 07 36
ING Bank Śląski S.A. o/Gliwice 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056



HR EXCELLENCE IN RESEARCH





1. Ocena aktualności wybranego tematu

Współczesne przedsiębiorstwa w rywalizacji o konkurencyjność swoich wyrobów i usług dążą do minimalizowania kosztów swojej działalności przy zachowaniu wymaganej jakości produktu. Naprzeciw tym działaniom, związanym z potrzebą redukcji kosztów działalności przedsiębiorstwa, wychodzi chociażby ograniczenie zużycia narzędzi. Niemniej jednak, wydłużenie żywotności narzędzi musi zachodzić przy zachowaniu wysokiej jakości obrabianych detali, co ma kluczowe znaczenie szczególnie w przemyśle lotniczym. Automatyzacja procesów wytwórczych sprzyja optymalizacji parametrów technologicznych co w konsekwencji pozwala na znaczną redukcję zużycia surowców, energii, a w konsekwencji do ograniczenia emisji szkodliwych substancji do atmosfery. Wprowadzenie optymalnych parametrów technologicznych w środowisku firmy stanowi istotny krok w kierunku zrównoważonego rozwoju, łączącego korzyści ekologiczne oraz finansowe.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej zatytułowanej „Wielokryterialna optymalizacja procesu szczotkowania zamka łopatkii turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A” uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce, co jest niezmiernie istotne ze względu na wdrożeniowy charakter doktoratu. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

2. Przegląd treści pracy

Rozprawę doktorską podzielono na siedem rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury, spisem rysunków i tabel, oraz dwóch załączników. Ponadto w pracy zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa została napisana na 105 stronach maszynopisu formatu A4.

Pierwszy rozdział nazwany „Wprowadzenie” stanowi wstęp do zasadniczych treści analizowanych w ramach recenzowanej dysertacji. Oprócz ogólnego scharakteryzowania potrzeb firmy prowadzących do zajęcia się realizowanym w ramach doktoratu tematem, Autor w rozdziale tym przedstawił przegląd wybranych artykułów naukowych odnoszących się do trzech grup tematycznych: optymalizacji procesów technologicznych, wykorzystania modelu Archarda do przewidywania zużycia elementów przez ścieranie, analizy kosztów procesu produkcyjnego. Autor w tym samym rozdziale zawarł cel i zakres pracy, choć zasadne byłoby nadać temu punktowi oddzielny rozdział. Cel pracy został scharakteryzowany jako optymalizacja wybranych parametrów operacji gratowania ostrych krawędzi w procesie produkcyjnym łopatek turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A, co w konsekwencji pozwoli na wydłużenie czasu eksploatacji narzędzia użytego do prowadzenia tego procesu. Zakres pracy został przedstawiony w czterech podpunktach i odpowiada treściom znajdującym się w pozostałych rozdziałach dysertacji.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Testy laboratoryjne” Autor przedstawił wyniki testów wstępnych mających na celu, rozpoznanie oddziaływań zachodzących na styku narzędzia z przedmiotem obrabianym, w postaci sił i momentów sił, w trakcie procesu gratowania. Przedstawiono wykorzystywane stanowisko laboratoryjne oraz wyniki prowadzonych badań w postaci zależności momentu siły powstającego w trakcie procesu gratowania detalu od głębokości jego wsunięcia dla różnych prędkości prowadzenia tego procesu.

W kolejnym, trzecim rozdziale, doktorant zawarł opis przeprowadzonych badań w środowisku przemysłowym. Badania przeprowadzono na specjalnie do tego celu zmodyfikowanym stanowisku badawczym. Zdefiniowano parametry wejściowe do procesu gratowania detali, które to będą podlegały modyfikacji oraz parametry wyjściowe będące rezultatem prowadzonych operacji w trakcie produkcji. W dalszej części rozdziału przedstawiono model badawczy w postaci planu statycznego zdeterminowanego dwupoziomowo służącego do wyznaczenia równania opisującego proces zużywania się narzędzi. W rozdziale tym zamieszczono ponadto zależność zmierzonej grubości włosa narzędzia od ilości obrobionych sztuk detali.

Rozdział czwarty recenzowanej dysertacji zatytułowany „Symulacja procesu szrotkowania z wykorzystaniem MES” dotyczył przedstawienia badań zmierzających do numerycznego określenia ilości ścieranego materiału z włosa w zależności od głębokości dosunięcia tarczy i jej prędkości obrotowej. W rozdziale tym przedstawiono model numeryczny tarczy i włosa utworzony w programie Ansys oraz wyniki prowadzonych analiz. Rozdział zakończono informacjami zawierającymi porównanie prowadzonych analiz numerycznych z otrzymanymi wynikami z eksperymentów stanowiskowych.

Rozdział piąty poświęcono przedstawieniu wdrożonych w procesie gratowania zestawu parametrów mających na celu wydłużenie okresu eksploatacji szrotki. W rozdziale tym zamieszczono dokumentację zdjęciową przedstawiającą stan obrabianych powierzchni przed i po procesie gratowania oraz zmierzone wartości promienia zaokrąglenia w wytypowanych punktach kontrolnych. Informacje te potwierdziły poprawność nowo przyjętych parametrów procesu.

Rozdział szósty to „Analiza kosztów procesu szrotkowania”. Treści zawarte w tym rozdziale potwierdzają zasadność prowadzonych badań z punktu widzenia biznesowego przedsiębiorstwa.

Rozprawa kończy się przedstawieniem wniosków końcowych oraz dalszym kierunkiem badań naukowych i wdrożeniowych, które miałyby przyczynić się do poprawy efektywności operacyjnej oraz zrównoważonego rozwoju firmy.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa generalnie posiada przejrzysty układ treści choć zdarzają się fragmenty, w których ma się wrażenie, że istotne informacje rozmieszczone są w przypadkowych miejscach pracy. W większości jej treść napisana jest poprawną polszczyzną chociaż zdarzają się nieliczne błędy stylistyczne.

Prowadzone w ramach dysertacji badania stanowiskowe i numeryczne stanowią logiczną całość. Od testów prowadzonych na stanowisku laboratoryjnym, poprzez badania w zakładzie produkcyjnym, modele numeryczne procesu ścierania włosa do określenia optymalnych parametrów procesu szrotkowania.

Realizowany temat pracy doktorskiej ma charakter wdrożeniowy. Stąd podjęte metody badawcze mają na celu opracowanie zestawu parametrów najkorzystniejszych z punktu widzenia realizowanych w przedsiębiorstwie operacji szrotkowania detali. Zaproponowany i wdrożony przez Autora proces badawczy został zawarty w czterech etapach.

W pierwszym mgr inż. Karol Falandys przeprowadził wstępne testy mające na celu, poznanie różnic, w generowanych w trakcie obrabiania detalu, sił i momentów tych sił pomiędzy narzędziem a obrabianym detalem w wyniku zmian parametrów procesu technologicznego. W tym celu Autor zaproponował stanowisko testowe, w skład którego wszedł robot przemysłowy wyposażony w kontroler siły. Umożliwiło to odwzorowanie ruchów operatora w trakcie manualnego procesu gratowania, co skutkowało wyznaczeniem sił i momentów powstających w wyniku oddziaływania dynamicznego narzędzia na powierzchnię obrabianego materiału. Przeprowadzone testy pozwoliły Autorowi na odnotowanie ciekawych spostrzeżeń, a mianowicie takich, że wzrost prędkości obrotowej narzędzia przekłada się wprost na zwiększenie obciążeń oraz że wzrost głębokości wsunięcia obrabianej części w szczotkę powoduje nieliniowy wzrost obciążenia. Mankamentem tej części badań jest zbyt mała liczba punktów pomiarowych, jedynie trzech. Na tej podstawie trudno jest określić jednoznaczny trend tych nieliniowości. Ponadto w pracy brakuje schematu obrazującego kierunki sił i momentów wyznaczanych w trakcie testów odniesione czy to do detalu, narzędzia czy układu pomiarowego.

W drugim etapie prac Autor podjął się zadania wyznaczenia optymalnych, pod kątem ograniczenia zużycia narzędzia, parametrów procesu technologicznego szczotkowania. Zaproponował statyczny plan badawczy oparty na trzech parametrach wejściowych: prędkości obrotowej narzędzia, głębokości dosuwu, ilości zatępionych detali. Za parametry wyjściowe, świadczące o poprawności wykonania operacji mgr inż. Karol Falandys przyjął wartość promienia zatępienia krawędzi oraz informację o tym, czy usunięto cały grat z obrabianego detalu. Otrzymany model matematyczny w postaci równania wiążącego parametry wejściowe pozwolił na określenie tempa procesu zużywania się narzędzia, konkretnie włosia. Jest to niezmiernie istotne osiągnięcie Autora przekładające się na wyznaczenie optymalnych parametrów procesu gratowania z punktu widzenia zużycia narzędzia, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej jakości krawędzi poddanych procesowi gratowania. W trakcie realizowanych badań dokonywano pomiaru grubości włosia. Niemniej jednak w pracy nie zamieszczono żadnych informacji na temat metod pomiarowych. W tabeli 10 w pracy przedstawiono zmierzone wartości grubości włosia, wykonane, należy przypuszczać dla 12 włosi. Pytanie brzmi, czy losowo wybieranych czy w jakiś konkretny sposób? Czy ze środka tarczy czy też z obrzeża, itp.

Niezaprzeczalnym walorem pracy jest przedstawiony w trzecim etapie model numeryczny włosia, umożliwiający analizę wpływu wybranych parametrów procesu gratowania na ilość ścierającego się materiału w trakcie trwania operacji szczotkowania. Model fizyczny powstał w oparciu o metodę elementów skończonych w środowisku Ansys Workbench Mechanical. Autor zbudował model pełnej tarczy w układzie płaskim wraz z symbolicznie reprezentowanym elementem obrabianym. Symulacja procesu ścierania włosia prowadzona była dla jednego z nich. Wymagało to przyjęcia warunków brzegowych – prędkość obrotowa tarczy oraz siłę docisku włosia do krawędzi obrabianego detalu. Siłę tę wyestymowano na podstawie prowadzonych uprzednio testów.

W trakcie symulacji nie uwzględniono wzajemnej interakcji włosa, która wpływa na wartość siły normalnej. Stąd nasuwa się pytanie o zasadność tak przygotowanego modelu. Siła ta ma zasadnicze znaczenie dla obliczanej całkowitej objętości zużycia ściernego, wg równania Archarda, które to Autor zastosował w obliczeniach numerycznych procesu zużycia włosa tarczy. Niemniej jednak na podstawie otrzymanych wyników uzyskano rozwiązanie porównywalne z wynikami eksperymentalnymi. W związku z tym, model ten może stanowić podstawę do szacowania trwałości narzędzia w zależności od różnych parametrów procesu i metod optymalnego ich doboru.

W czwartym, ostatnim etapie pracy zawarto wdrożenie opracowanych, optymalnych pod względem zużycia narzędzia parametrów procesu technologicznego oraz weryfikację zmian w warunkach produkcji wielkoseryjnej.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania: opracowania procedury badawczej oraz przeprowadzenia badań zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych w celu wydłużenia żywotności narzędzi przy zachowaniu wysokiej jakości detali. W trakcie realizacji badań wykazano istnienie lokalnego minimum zużycia materiałów ściernych stosowanych w operacji gratowania detali, co umożliwiło zwiększenie liczby obrabianych części z wykorzystaniem jednego narzędzia.

Osiągnięcie postawionego celu wymagało od Autora:

- opracowania laboratoryjnego i przemysłowego stanowiska badawczego w celu rozpoznania zjawisk dynamicznych zachodzących pomiędzy narzędziem a obrabianym detalem w trakcie procesu gratowania, w tym momentów oraz sił wzajemnego oddziaływania,
- opracowania metodyki badawczej prowadzenia badań eksperymentalnych zmierzających do wyznaczenia optymalnych parametrów procesu szczotkowania detali,
- opracowania modelu numerycznego w środowisku programu ANSYS Workbench procesu zużycia narzędzia,
- zastosowania programów komputerowych w celu analizy zbiorów danych pomiarowych.

Opracowane metody i algorytmy zostały zweryfikowane w trakcie badań stanowiskowych. Recenzowana praca wskazuje, że Doktorant wykazał się umiejętnością łączenia wiedzy teoretycznej i praktycznej.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne, dotyczy bowiem istotnych zagadnień, szczególnie w aspekcie doboru optymalnych parametrów obróbki szczotkowania.

4. Ocena końcowa

Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny, nie pomniejszają jednak osiągnięć Doktoranta w uzyskiwaniu wartościowych wyników naukowych i poznawczych. Mają zwrócić uwagę na dalszą pracę i uczulić na staranność w przygotowaniu samodzielnych opracowań naukowych, wnikliwą analizę oraz zgłębianie realizowanych przez Autora problemów badawczych.

Dokładna analiza dysertacji mgr. inż. Karola Falandysa pt. „Wielokryterialna optymalizacja procesu szrotkowania zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A” pozwala stwierdzić, że recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badań z zakresu inżynierii powierzchni, technologii obróbki mechanicznej oraz zastosowania metod optymalizacji wielokryterialnej w procesach wytwarzania. Zagadnienia te mają wysoki potencjał praktyczny, zwłaszcza w kontekście zwiększania trwałości elementów maszyn, poprawy jakości powierzchni oraz efektywności procesów technologicznych. Stanowi ona wartościowy naukowo, oryginalny wkład w rozwój tych metod. Autor w swojej pracy podjął próbę kompleksowego ujęcia problemu, łącząc aspekty technologiczne, matematyczne i eksperymentalne. Zakres podjętych badań, a także zastosowanie nowoczesnych narzędzi analitycznych i metod optymalizacyjnych, świadczą o dużym stopniu oryginalności oraz zaawansowania naukowego rozprawy.

Podsumowując to co zostało szczegółowo wykazane w niniejszej recenzji, rozprawa mgr. inż. Karola Falandysa pt. „Wielokryterialna optymalizacja procesu szrotkowania zamka łopatki turbiny niskiego ciśnienia silnika LEAP-1A” spełnia wszystkie wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.), tj.: – prezentuje wiedzę teoretyczną oraz praktyczną Autora w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna w zakresie opracowania optymalnych parametrów procesu gratowania, potwierdza umiejętność samodzielnego definiowania problematyki badań naukowych, ich prowadzenia oraz analizowania i interpretacji ich wyników, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowania kompleksowej, numeryczno-eksperymentalnej metody optymalizacji parametrów procesu gratowania ostrych krawędzi podczas produkcji łopatek turbiny niskiego ciśnienia, spełnia wymogi formalne w zakresie posiadania formy monografii naukowej opatrzonej streszczeniem w języku polskim i angielskim.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Karola Falandysa do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej, rekomendując nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

Stanisław Duda