

dr hab. inż. Piotr Skawiński, prof. PW
Zakład Technik Wytwarzania
Instytut Podstaw Budowy Maszyn
Politechnika Warszawska
ul. Narbutta 84
02-524 Warszawa
tel: 22- 849-03-01
e-mail: piotr.skawinski@pw.edu.pl

Warszawa, 5.05.2023

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr inż. Wiesława Budzisz

**Badanie wpływu procesów obróbki wykańczającej zębów na
zacieranie przekładni lotniczych**

Podstawa opracowania

Pismo dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o numerze RM-530-04-01/2022 na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej z dnia 30 listopada 2022 roku.

1. Temat rozprawy doktorskiej

Koła zębate w tym koła walcowe są stosowane jako przekładnie mechaniczne napędu wielu obiektów/mechanizmów i urządzeń. Szczególnie wysokie wymagania stawia się kołom zębatym napędzającym osprzęt akcesoryjny (Accessory Gear Train) i koła reduktora napędu wentylatora Fan Drive Gear System turbowentylatorowego silnika lotniczego. Koła zębate przekładni AGB pracujące pod mniejszym obciążeniem są szlifowane i operacja ta prowadzona na nowoczesnych szlifierkach CNC daje rezultat wystarczający do zapewnienia prawidłowej pracy zazębienia, a tym samym zapewnia wymaganą trwałość przekładni. Wysokie wymagania to nie tylko wysoka klasa dokładności, jakość, trwałość i wytrzymałość zmęczeniowa, ale także w skali mikro odporność na mikropitting. Wysoko obciążone koła zębate jakie występują nie tylko w turbowentylatorowych silnikach lotniczych podlegają zużyciu ściernemu również w skali mikro. Innymi zjawiskami które mogą pojawić się przy wysokich prędkościach obrotowych, a takie występują w silnikach lotniczych, to scuffing i fretting, a także lokalne zużycie ściernie. Mając na uwadze wymienione wyżej zagadnienia zużycia powierzchni bocznej zęba wpływające na trwałość zazębienia należy zadbać nie tylko o konstrukcję zazębienia ewolwentowego, ale i odpowiednie procesy obróbki wykończeniowej powierzchni bocznych zębów. Szlifowanie uzębienia, które jest jedną z ostatnich operacji w procesach technologicznych w przemyśle motoryzacyjnym, tutaj jest operacją wyjściową (zazwyczaj półwykończeniowe i wykończeniowe) do obróbki wibrochemicznej czy wibrościerniej kół przekładni Fan Drive Gear System (FDGS). Te operacje mają zapewnić chropowatość powierzchni bocznej zęba R_a mniejszą niż $0.0875 \mu\text{m}$. Tak wysoko postawione wymagania w tym struktury geometrycznej powierzchni bocznej zębów mają swoje uzasadnienie nie tylko w bezpieczeństwie przewozów lotniczych, trwałości eksploatacyjnej przekładni, ale i kosztach procesów technologicznych. Aktualnie kluczowym

dostawcą modułu FDGS (wg informacji zawartej w rozdziale „Wprowadzenie” na str.9 pracy doktorskiej) jest Pratt&Whitney Rzeszów dla którego poziom części brakowych „*jest nieakceptowalny oraz wymaga odpowiednich działań*”. Obróbka wibrochemiczna nie ma charakteru ekologicznego z racji tworzonych w znacznych ilościach (72 l na jedno koło zębate) niebezpiecznych odpadów opisanych w Dzienniku Ustaw i Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2014r. Stąd też zdaniem Doktoranta zaistniała potrzeba prowadzenia badań nad rozwojem alternatywnej metody wykończeniowej podnoszącej poziom jakościowy kół FDGS przy jednoczesnej eliminacji niebezpiecznych odpadów i ograniczenia kosztów procesu technologicznego obróbki wykończeniowej.

Tym zagadnieniom poświęcona jest recenzowana praca. Uwzględniając powyższy opis, jej tematyka, cele i zakres są wybrane bardzo trafnie.

Temat rozprawy jest więc zatem wybrany właściwie, a rozważone w niej zagadnienia dotyczące badań, od określenia metodyki badań, dalej badań wstępnych i zasadniczych oraz weryfikacyjnych mają charakter wdrożeniowy i w istotny sposób przyczynią się do wprowadzenia alternatywnej obróbki wykończeniowej walcowych kół zębatach.

2. Omówienie rozprawy

Praca doktorska jest podzielona na 9 rozdziałów, z których ostatni jest spisem literatury – 65 pozycji wydawniczych i 59 źródeł elektronicznych. Większość pozycji literaturowych jest datowana po roku 2000, zaś pozycja [26] wydana została w 2021r. W spisie literatury nie znalazłem żadnej pozycji autorskiej lub współautorskiej Doktoranta. Dobór źródeł literaturowych uważam za właściwy, zgodny z tematyką rozprawy. Do pracy dołączono jeden załącznik oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Rozprawę rozpoczyna „Wprowadzenie” w którym wstępnie zasygnalizowano problematykę rozwijaną w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale 1 „Analiza literatury” Doktorant przedstawia charakterystykę statków powietrznych lotnictwa cywilnego, a także dokonuje przeglądu jednostek napędowych samolotów pasażerskich dając tym samym tło później rozważanej problematyce prowadzenia obróbek wykończeniowych boków zębów przekładni walcowych, w szczególności reduktora Fan Drive Gear System. Rozdział zawiera w kolejnych podrozdziałach charakterystykę procesów wykończeniowych kół zębatach w kontekście alternatywnych metod obróbki. Bogato ilustrowany podrozdział 1.5 zawiera opis i rysunki (fotografie) zużycia zmęczeniowego w tym w skali mikro. W podsumowaniu rozdziału Doktorant artykułuje iż propozycja alternatywnej obróbki wykończeniowej będącej przedmiotem badań ma biznesowe uzasadnienie.

Rozdział drugi to „Cel, hipoteza i zakres pracy”. Przyjętym celem jest uzyskanie parametru chropowatości R_a poniżej $0,0875 \mu\text{m}$ dla bocznych powierzchni zębów wysokoobciążonych kół zębatach przekładni FDGS. Sformułowana hipoteza naukowa rozprawy przyjmuje, że możliwe jest zastosowanie obróbki wibrościernej (dostawca obróbki wibrościernej firma OTEC Prazisionsfinish GmbH wybrana na podstawie projektu Innolot/INCBiR/2014) zamiast procesu wibrochemicznego, a także takie dobranie parametrów procesu wibrościernego by zapewnić wymaganą żywotność i niezawodność przekładni. Z tak postawionym celem i hipotezą naukową wiąże się zakres pracy, a mianowicie analizą topografii powierzchni bocznych zębów poddanych procesowi wibrochemicznemu, analizą topografii powierzchni bocznych zębów poddanych losowym parametrom procesu obróbki wibrościernej, dobraniem metodą badawczą parametrów obróbki wibrościernej dla kół z programu PW1500G, wykonanie badań na zatarcie kół FZG poddanych obróbce wykończeniowej oboma metodami, a także wyznaczenie zmienności usuwanego materiału wzdłuż zarysu zębów kół FDGS przy zdefiniowanych parametrach obróbki wibrościernej. Rozdział 3 zatytułowany „Program i metodyka badań” w kolejnych

podrozdziałach od 3.1 do 3.6 poza omówieniem motywacji prowadzenia obróbki wibrościernej, historii prac w Pratt&Whitney Rzeszów nad alternatywną obróbką wykończeniową przekładni FDGS, charakterystyką procesu firmy OTEC Prazisionsfinish GmbH, dobraniem narzędzi pomiarowych do weryfikacji topografii powierzchni bocznych zębów, Doktorant precyzuje plan eksperymentu. Eksperyment zakłada badania wstępne polegające na analizie topografii powierzchni bocznych zębów jednego z kół przekładni FDGS po obróbce wibrochemicznej, a także przeprowadzenie testu hamownianego RIG zakończonego analizą przyspieszonego zużycia dla losowych parametrów obróbki wibrościernej. W planie badań zasadniczych założono opracowanie takich parametrów obróbki wibrościernej, przy których przekładnia FGDS będzie mogła pracować z określoną trwałością i niezawodnością, zaś symulacja pracy przekładni FDGS prowadzona w Karlsruhe University of Technology pozwoli na zdefiniowanie wartości ustawczych urządzenia obróbczego. Plan eksperymentu kończą badania weryfikacyjne dotyczące prób zatarciowych kół FZG pracujących na stanowisku w układzie mocy krążącej.

Rozdział 4 to szczegółowo opisane badania wstępne bocznych powierzchni zębów poddanych wykończeniowej obróbce wibrochemicznej REM-CHEM. Badania dotyczyły oceny topografii powierzchni bocznej zębów tj. chropowatości, falistości i izotropowości. Podrozdział 4.2 to również badanie bocznych powierzchni zębów analogicznie jak w podrozdziale 4.1 lecz dla procesu wibrościernego, w tym również z losowymi parametrami obróbki wibrościernej. Podrozdział 4.3 opisuje i bogato ilustruje stopień zużycia powierzchni bocznych zębów po teście hamownianym, w tym również w odniesieniu do obróbki wibrochemicznej. Podrozdział 4.4 gromadzi rozważania na temat innych przyczyn przedwczesnego zużycia kół zębatych tj. na przykład lokalne zużycie przez obce cząstki, możliwość ryzyka wystąpienia niewłaściwych zaokrągleń ostrych krawędzi wierzchołków zębów, falistości, potencjalnego spadku twardości oraz różnic w rozkładzie twardości warstwy wierzchniej.

Interesująco przedstawiają się badania zasadnicze opisane w kolejnych podrozdziałach rozdziału 5. W podrozdziale 5.1 wyspecyfikowano wymagania stawiane procesowi wibrościernemu od strony konstrukcyjnej uzębienia, technologicznej wiążącej się z powtarzalnością wyników obróbki, eksploatacyjnej tj. spełnieniu wymagań dotyczących boroskopowania jako czynności serwisowej przekładni FDGS na skrzydle samolotu. Powyższe wymagania uzupełniono o uwarunkowania odbiorcze określone procedurą VIS 637 głównie oparte o wizualną ocenę kół FDGS. Zdaniem Autora do pakietu wymagań należy dołączyć wymagania opracowane na podstawie wiedzy literaturowej np. zapewnienie wysokiego stopnia izotropowości powierzchni bocznej zębów czy też uzyskanie właściwości morfologicznych powierzchni zębów zapewniających założoną trwałość i niezawodność. Omawiając stawiane wymagania procesowi wibrościernemu kół przekładni FDGS Doktorant, i słusznie, zaliczył wymagania zdefiniowane na podstawie wiedzy nabytej w czasie badań wstępnych. Kolejne podrozdziały na 50 stronach rozprawy zajmują definicje wielkości sterowalnych, analiza stanu powierzchni wejściowej do obróbki wibrościernej, badania topografii powierzchni bocznej zębów po procesie wibrościernym, sprawdzanie wpływu usuwanego materiału na głębokość warstwy nawęglonej. Ostatnie strony rozdziału 5 to wnioski z badań zasadniczych dla konkretnych trzech kół słonecznych przekładni FDGS. Oprócz pozytywnych wniosków z przeprowadzonych badań, a mianowicie osiągnięcia żądanej chropowatości, zachowania zadanej grubości zębów zgodnie z tolerancją rysunkową, parametrów falistości, które są mniejsze od obróbki izotropowej, właściwej topografii powierzchni bocznych zębów, w jednym przypadku parametry obróbki wibrościernej nie są rekomendowane. Z przeprowadzonych badań wynika, iż parametry procesu wibrościernego dla koła słonecznego o numerze LSEJAN7624 są właściwie dobrane i dają analogiczne poprawne rezultaty jak w przypadku obróbki wibrochemicznej technologią REM-CHEM.

Istotną wartością dysertacji są badania weryfikacyjne zawarte w rozdziale 6. W podrozdziale 6.1 Doktorant szczegółowo omawia przygotowanie próbek do badań i plan testów. Testem są badania na zatarcie na stanowisku T-12UF z zastosowaniem kół FZG A10. W badaniach na zatarcie powierzchnią referencyjną była powierzchnia z obróbki wibrochemicznej. Badania zatarciowe wykonano dla kół po obróbce wibrościerniej przeprowadzonej dla losowych parametrów procesu i dwukrotnie dla tejże samej obróbki wykończeniowej, ale dla parametrów procesu zdefiniowanych w rozprawie. Wyniki badań zestawiono w tabelach 6.7 do 6.11, zaś inspekcje boroskopem kół po obu obróbkach wykończeniowych (wibrochemicznej i wibrościerniej) zestawiono na rys. 6.18 do 6.20. Inspekcję kamerą (Digital Microscope) powierzchni bocznych zębów kół napędzających FZG poddanych obróbce wibrochemicznej i wibrościerniej dla różnych parametrów procesu pokazano na rys. 6.22. Rozdział ten kończą „Wnioski z badań zatarciowych”. Wnioski zarówno po obróbce wibrochemicznej i wibrościerniej sprowadzono do oceny stopnia obciążenia niszczącego, oceny stopnia zużycia w ocenie boroskopem, oceny progresji zużycia małego koła przy kolejnych stopniach obciążenia. Z oceny pozostałych parametrów, które mierzono w badaniach zatarciowych jak np. pomiary momentów tarcia zauważono, że tarcie pary zębatej było mniejsze dla kół po obróbce wibrościerniej.

Rozdział 7 przedstawia „Analizę zmienności usuwanego materiału wzdłuż zarysu zębów w procesie wibrościernym i wibrochemicznym wskazując, iż zmienność procesu jest na poziomie zaledwie 2 μm . Jednakże ze wskazaniem na proces wibrościerny z racji bardziej łagodnej zmiany w obszarze wierzchołków (rys. 7.2).

Rozdział 8 to „Podsumowanie, wnioski, elementy oryginalne pracy”. We wnioskach ogólnych Doktorant stwierdził, że na podstawie przeprowadzonych analiz i wielopłaszczyznowych badań, możliwe jest zastosowanie obróbki wibrościerniej jako alternatywnej do obróbki wibrochemicznej w produkcji wysokoobciążonych kół zębatych przekładni Fan Drive Gear System. Pozytywne rezultaty badań z zachowaniem kryteriów jakościowych (trwałość i niezawodność), ochrony środowiska (eliminacja szkodliwych substancji z procesu obróbki wykończeniowej) i redukcja kosztów (charakter biznesowy) dają podstawy do wdrożenia obróbki wibrościerniej w Pratt&Whitney Rzeszów.

3. Uwagi szczegółowe

Recenzowana praca poprawna od strony merytorycznej i zastosowanych metod badawczych nie jest wolna od uchybień, niekiedy niejednoznacznych sformułowań, drobnych usterek edycyjnych czy też tzw. literówek. Obszerny przegląd literatury na 40 stronach, co prawda daje tło problematyce poruszanej w rozprawie, ale w kilku początkowych podrozdziałach informacje tam zawarte nie wnoszą merytorycznych wartości. Podobnie w podrozdziale 3.5. rysunki/fotografie od 3.25 do 3.33 są ilustracją wybranych urządzeń pomiarowych jednakże nie wnoszą istotnych informacji. Wystarczyłoby tekst z podrozdziału 3.5. Na wielu rysunkach znajduje się tekst angielski przez przywołanie do literatury źródłowej, bądź z racji wyświetlania informacji przez aparaturę pomiarową. Nie jest to poważną usterką edycyjną, ale dla przejrzystości i czytelności rozprawy powinien być to tekst w języku polskim. Rozumiem, że w wielu publikowanych źródłach czy też w raportach np. pomiarowych jest najczęściej tekst w języku angielskim, to jednak w polskich opracowaniach naukowych, a do tych należy rozprawa doktorska powinien pojawić się tekst w języku polskim

3. Ocena ogólna rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Wiesława Budziszka pt. „Badanie wpływu procesów obróbki wykańczającej zębów na zacieranie przekładni lotniczych” ujmuje

kompleksowo zagadnienia badawcze związane z procesem obróbki wykończeniowej zębów kół walcowych wysokoobciążonych przekładni lotniczych Fan Drive Gear System. Rozprawa jest bogato ilustrowana rysunkami/fotografiami co wpływa na przejrzystość, czytelność i merytoryczną wartość dysertacji. Liczne tabele z prezentowanymi parametrami omawianych procesów i wynikami badań wzmacniają jej wartość merytoryczną. Praca została zaprezentowana na 201 stronach. Jest napisana zrozumiałym, technicznie poprawnym językiem. Wyniki badań zatarciowych potwierdzają spełnienie założonego celu rozprawy. Jej wartość merytoryczna stanowi podstawę do rozpoczęcia prac wdrożeniowych w Pratt&Whitney Rzeszów.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska "Badanie wpływu procesów obróbki wykańczającej zębów na zacieranie przekładni lotniczych" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie mgr inż. Wiesława Budzisa do publicznej obrony, a po jej pozytywnym przebiegu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Warszawa, 5.05.2023r.