

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Roberta Fularskiego nt.: „**Wpływ konwencjonalnego dłutowania oraz innowacyjnej obróbki Power Skiving na kształtowanie cech jakościowych powierzchni poddanych obróbce oraz właściwości warstwy nawęglonej kół zębatych wykonanych ze stali Pyrowear 53**”

Promotor: dr hab. inż. Ryszard Filip, prof. PRz.

Promotor pomocniczy: dr inż. Anna Bazan

Podstawa opracowania: pismo z dnia 30 listopada 2022 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz.

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 333 strony, a w tym: 3 str. spisu treści, 311 str. zasadniczej części pracy, 22 str. wykazu literatury (225 pozycji) oraz 1 załącznik. Praca składa się z 8 głównych rozdziałów.

We wprowadzeniu - rozdział 1 (s.8) Autor rozprawy podkreśla, że w przemyśle lotniczym ciągle są prowadzone badania nad poszukiwaniem nowych, udoskonalonych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych w celu poprawy niezawodności statków powietrznych. Przykładem jest zastosowanie przekładni wielodrożnej w układzie sprężarka niskiego ciśnienia-wentylator w silnikach turbowentylatorowych. Efektem tych rozwiązań jest między innymi optymalizacja konstrukcji silnika i poprawa parametrów jego pracy oraz zmniejszenie zużycia paliwa, emisji hałasu, redukcja tlenków azotu.

Głównym elementem konstrukcyjnym przekładni silników lotniczych są koła zębate, które w trakcie eksploatacji są poddawane wysokim, cyklicznie zmiennym obciążeniom. Zatem muszą one być odporne na obciążenia dynamiczne i wysokie naciski powierzchniowe, zmęczenie stykowe, zużycie ściernie i na naprężenia kontaktowe w warstwie wierzchniej.

Warunki pracy przekładni lotniczych wymagają zastosowania wysokojakościowych, starannie wyselekcjonowanych gatunków stali stopowych i zastosowania odpowiedniej technologii wykonania kół zębatych. **Podjęcie badań przez Doktoranta nad opracowaniem i możliwością wdrożenia technologii Power Skiving w przemyśle lotniczym jest w pełni uzasadnione.**

W rozdziale 2 - analiza literatury (s.13 - s.109) Doktorant przedstawił gruntowną charakterystykę istotnych zagadnień dotyczących konstrukcji i technologii kół zębatych o zębach skośnych, które są stosowane w przekładniach planetarnych. Zaproponował kompleksową analizę odnośnie do kształtowania parametrów kół zębatych, stosowanych w przekładniach do przeniesienia momentu obrotowego i prędkości obrotowej. Ta analiza dotyczy zarówno procesów obróbki ubytkowej, jak i procesów obróbki cieplno-chemicznej, które wpływają na parametry procesów obróbki wykończeniowej, a w konsekwencji na właściwości użytkowe przekładni zębatych.

W podrozdziale 2.2 (rozdział 2) zostały scharakteryzowane:

- zależności do wyznaczenia parametrów konstrukcyjnych indywidualnych kół zębatych (wzory 2.1 - 2.9), a także kół zębatych współpracujących (wzory 2.10 - 2.16), oraz kół zębatych daszkowych;

- wybrane sposoby obróbki skrawaniem, tj. dłutowanie metodą Fellowsa kół o zębach prostych oraz kół o zębach skośnych (odmiany: metoda kształtowa i metoda obwiedniowa);
- odmiana metody obwiedniowej - Power Skiving (złuszczanie obwiedniowe). W metodzie Power Skiving narzędzie zazębia się z wytwarzanym kołem zębatym z równoczesnym przemieszczaniem się w kierunku równoległym do osi koła nacinanego. Oś narzędzia jest nachylona do osi obrabianego przedmiotu (rys.2.14 - rys.2.16). Odpowiednie zależności do określenia poprawnego zazębienia w układzie narzędzie-przedmiot zostały ujęte we wzorach (2.21 - 2.48), a w odniesieniu do prędkości skrawania we wzorach (2.49 - 2.57);
- geometria ostrzy narzędzia do metody Power Skiving (rys.2.18 - rys.2.19), która jest ściśle związana z geometrią nacinanego uzębienia oraz odpowiednimi nastawami obrabiarki do tego procesu tak, aby uzyskać założone tolerancje wyrobu. Autor rozprawy zwraca między innymi uwagę na dwa istotne problemy, tj. zużycie ostrzy, bowiem narzędzie pracuje przy ujemnych kątach natarcia, a to zwiększa opory skrawania (rys.2.20) oraz na niekorzystny kształt wióra (rys.2.23)

Na warunki pracy uzębienia wpływają geometria i jakość technologiczna powierzchni zębów kół zębatych (podrozdział 2.3). Doktorant bazując na wymaganiach zawartych w normie ANSI/AGMA 2000-A88 w odniesieniu do przekładni lotniczych szczegółowo zilustrował weryfikowane parametry koła zębatego, tj.: odchyłkę grubości zęba (rys.2.26); odchyłki zarysu zęba (rys.2.27 - rys.2.29); odchyłki linii zęba (rys.2.30 - rys.2.32); błędy [oddziałości (rys.2.33 - rys.2.35); korekcje zarysu (rys.2.36 - rys.2.38) oraz linii zęba (rys.2.39 - rys.2.42).

Podstawą do oceny właściwości eksploatacyjnych i trwałości przekładni lotniczych jest topografia powierzchni zębów przekładni zębatych, a w szczególności kształt, falistość, chropowatość. Te cechy są kształtowane głównie w procesach obróbki wykończeniowej (przykłady - rys.2.46). Wybrane parametry chropowatości i związane z nimi normy zostały omówione i zestawione w tab.2.1. W tab.2.3 Doktorant zestawiał parametry chropowatości w wymiarze 2D i ich odpowiedniki w układzie 3D.

Na niezawodność przekładni zębatych znaczący wpływ wywiera stan naprężeń w warstwie wierzchniej zębów, które są powstają w wyniku operacji technologicznych oraz obciążeń przekładni w czasie jej eksploatacji (podrozdział 2.4). Mogą to być naprężenia ściskające (korzystne) lub rozciągające (niekorzystne). Doktorant z dużą skrupulatnością przedstawił charakterystykę i ilustracje dotyczące zasady pomiaru naprężeń metodą dyfrakcji rentgenograficznej (rys.2.55 - rys.2.61) wskazując także zalety i wady tej metody.

Na właściwości warstwy wierzchniej obrabianego materiału wywiera wpływ proces obróbki mechanicznej (proces skrawania, proces nagniatania). Charakterystyka konstytuowanej warstwy wierzchniej (podrozdział 2.5) została przedstawiona na rys.2.63, a liczne przykłady potencjalnych wad powstałych w wyniku procesu skrawania zostały zilustrowane na rys.2.64 - rys.2.72. Wady te wpływają na właściwości użytkowe wyrobów i dlatego w przemyśle lotniczym powinny (i muszą) być kontrolowane z uwzględnieniem przepisów zawartych w odpowiednich normach dla tej branży.

Aby uzyskać wymagane właściwości eksploatacyjne wyrobów dla przemysłu lotniczego konieczne jest także zastosowanie odpowiednich procesów obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej (podrozdział 2.6). To zagadnienie podjął również mgr inż. Robert Fularski w swoich badaniach. We wstępnej analizie przedstawił różne, możliwe do zastosowania warianty i mechanizmy dyfuzji atomów w zabiegach obróbki cieplnej (rys.2.73 - rys.2.76). Następnie główną uwagę skoncentrował na procesie nawęglania i przemianach zachodzących w stali podczas tego procesu. Syntetycznie przedstawił te aspekty na wykresie równowagi żelazo-węgiel.

Po procesie nawęglania następuje proces hartowania i będące jego wynikiem przemiany fazowe. Te procesy zostały wyczerpująco omówione w rozprawie. Proces nawęglania, a następnie występujące po nim zabiegi hartowania, wymrażania i odpuszczania umożliwiają uzyskanie wymaganej twardości powierzchni, odporności na ścieranie i na naciski powierzchniowe przy dobrej wytrzymałości zmęczeniowej gotowego wyrobu. Dzięki tym efektom nawęglanie jest stosowane także w procesach technologicznych obróbki kół zębatych. Jednym ze sposobów sprawdzenia efektów nawęglania są pomiary twardości powierzchni nawęglonej, twardości rdzenia, głębokości efektywnej warstwy nawęglonej, które także zostały przedstawione w pracy doktorskiej.

Rozdział 3 - cel, hipoteza i zakres pracy (s.110 - s.111) zawiera klarownie przedstawioną koncepcję przeprowadzenia badań (rys.2.1) wraz krótkim komentarzem w odniesieniu do problemu naukowego, celu badawczego i zakresu pracy

Uwaga: w odniesieniu do sformułowanej hipotezy pracy uważam, że nie powinna ona być formułowana w stylu podwójnego zaprzeczenia „... nie wpływa, ... nie oddziałuje...”

Można by ją sformułować np. następująco: ***zastosowanie procesu kształtowania zębów metodą Power Skiving w procesie produkcyjnym kół zębatych ze stali Pyrowear 53 spełnia wymagania jakościowe, stawiane przekładniom planetarnym dla przemysłu lotniczego.***

Rozdział 4 - program i metodyka badań (s.112 - s.136) zostały szczegółowo opisane. Doktorant wykazał, że kolejne etapy pracy badawczej zostały precyzyjnie zaplanowane i podporządkowana głównemu celowi rozprawy doktorskiej. Również jednoznacznie zostały przedstawione charakterystyki stanowisk i aparatury pomiarowej, tj.:

- stanowiska badawczego do obróbki metodą Power Skiving;
- stanowiska do obróbki metodą Fellowsa;
- przedmiotu badań, tj. kół zębatych typu satelitarnego przekładni Fan Drive Gear System (FDGS);
- narzędzi obróbkowych;
- wybranych przyrządów i maszyn pomiarowych.

Rozdział 5 - badania na pojedynczych sztukach kół zębatych (s.137 - s.231) zawiera obszerny materiał dokumentujący wykonane badania wraz z analizą i oceną uzyskanych wyników.

Narzędzia do obróbki skrawaniem kół zębatych zostały dostarczone przez uznanego producenta - firmę Gleason. Z uwagi na ograniczenie kosztów badań Doktorant skoncentrował się na doborze parametrów obróbki i sposobie doprowadzenia chłodziwa.

W **I etapie** były zastosowane narzędzia o kącie pochylenia linii zęba $\beta = 15^\circ$. Parametry nacinania uzębień były zmieniane w szerokim zakresie. W **II etapie** były zastosowane narzędzia o kącie pochylenia $\beta = 18^\circ$ w węższym zakresie zmienności parametrów i zmienianym układzie dysz doprowadzających chłodziwo do strefy obróbki.

Na próbę kontrolną zostały wykonane koła zębate metodą Fellowsa na dłutownicy Gleason Pfauter P 300 ES (parametry obróbki - tab.5.1). Pomiary geometrii uzębień zostały wykonane na urządzeniu P 100 firmy KlingelInberg (raporty z pomiarów - rys.5.1 - rys.5.3). Wykonane uzębienia kontrolne spełniały wymagania technologiczne, określone dla koła satelitarnego przekładni. Również wizualna ocena (rys.54. i rys. 5.5) oraz pomiary chropowatości powierzchni (rys.5.6 - rys.5.11) naciętych uzębień potwierdziły spełnienie wymagań technologicznych.

Badania procesu skrawania metodą Power Skiving zostały wykonane na obrabiarce Gleason 600 PS w dwóch etapach. **Etap I** obejmował szerszy zakres parametrów wejściowych (parametry skrawania - tab.5.2). Głównym celem było określenie w pięciu próbach badawczych wpływu zmiennych parametrów skrawania na czas obróbki i błędy wybranych cech geometrycznych, tj.:



odchyłki pochylenia zarysu, odchyłki kształtu zarysu, całkowitej odchyłki zarysu, odchyłki pochylenia linii zęba, odchyłki kształtu linii zęba, całkowitej odchyłki linii zęba, błędu podziałki, sumarycznego błędu podziałki, maksymalnej różnicy podziałek sąsiednich, błędu bicia zębów. W każdej próbie były nacięte dwa wieńce jednego koła daszkowego, a każdy wieniec był nacinany w 15 przejściach obróbkowych. Wyniki pomiarów zostały zestawione w tab.5.2 - tab.5.6 oraz na rys.5.12 - 5.19 i rys.5.21 - rys.5.22.

W **1 próbie** metody Power Skiving celem było oszacowanie bezpiecznego zakresu parametrów skrawania, aby nie doszło do uszkodzenia narzędzia. Ponieważ nie zaobserwowano niekorzystnych zdarzeń związanych z obciążeniem wrzeciona obrabiarki i geometrią nacinanego uzębienia daszkowego w **2 próbie** zwiększono prędkość skrawania przy równoczesnym zmniejszeniu posuwu do wartości z próby 1. W tym przypadku również brak było znaczących zmian odchyłek badanych wielkości, natomiast skrócony został o 10% czas obróbki uzębień. W **3 próbie** ponownie zwiększono prędkość posuwu do wartości z próby 1 przy zachowaniu prędkości skrawania z próby 2. Nie stwierdzono istotnego zwiększenia wartości odchyłek przy ok. 30% zmniejszeniu czasu obróbki w odniesieniu do próby 2 do ukształtowania uzębienia obydwu wieńców koła planetarnego. W **próbie 4** procesu skrawania zastosowano zwiększoną prędkość posuwu. Nie stwierdzono znaczącego zwiększenia wartości odchyłek badanych wielkości, ani też zwiększonego zużycia ostrzy narzędzia. Zwiększyła się grubość wióra przy ok. 26% redukcji czasu obróbki do wykonania obydwu uzębień koła satelitarnego. Natomiast wystąpiło niekorzystne zwiększenie ilości wywiniętego materiału na krawędzi zębów przy wyjściu ostrzy narzędzia ze strefy obróbki oraz przytwierdzania wiórów na powierzchniach bocznych zębów. W **próbie 5** zwiększono prędkość skrawania o ok. 40 % w stosunku do próby 3 przy zachowaniu pozostałych parametrów skrawania z próby 4. Osiągnięto ok. 22% redukcję czasu obróbki w porównaniu do próby 4 przy braku znaczącego wzrostu odchyłek w geometrii uzębienia i zużycia ostrzy. Jednak wystąpił wzrost wielkości wywiniętego materiału na krawędzi zębów przy wyjściu ostrzy ze strefy obróbki.

W podsumowaniu wyników badań w etapie I Doktorant stwierdził, że najkorzystniejszy wynik obróbki uzyskano w próbie 2.

W **etapie II** Doktorant zwrócił główną uwagę na konieczność minimalizacji niekorzystnego zjawiska zgrzewania wiórów do powierzchni zębów oraz powstawania wywiniętego materiału w obszarze wychodzenia ostrzy ze strefy skrawania. Zostały wykonane 3 próby badawcze. Zmodyfikowana została geometria narzędzi poprzez zastosowanie kąta pochylenia linii ostrzy $\beta = 18^\circ$ oraz kąta przecięcia $\Sigma = 16^\circ$ o wartości dodatniej w celu kształtowania uzębienia o lewym kierunku linii zębów i wartości ujemnej dla kształtowania uzębienia o prawym kierunku linii zębów.

W **próbie 6** parametry skrawania były zbliżone do parametrów w próbie 2. W **próbie 6** (parametry skrawania - tab.5.7). zostało wyraźnie ograniczone zgrzewanie wiórów do powierzchni bocznych zęba. W **próbie 7** (parametry skrawania - tab.5.8) zastosowano zestaw dysz zapewniających skuteczne wyptukiwanie wiórów ze strefy skrawania. W **próbie 8** (parametry skrawania - tab.5.8) zostały zmodyfikowane wartości dosuwu i posuwu ostatniego stopnia obróbki, dzięki czemu zwiększona została grubość wióra w ostatnim przejściu i obniżenie możliwości pęknięcia wiórów podczas obróbki.

Uzębienie kół zębatych kształtowane z parametrami skrawania próby 8 zostano poddane ocenie na odpowiednich urządzeniach pomiarowych (ich charakterystyki zostały opisane w rozprawie), a wyniki zostały zestawione na rys.5.30 - rys.5.36.

W kolejnych badaniach zostały wykonane pomiary i analiza topografii powierzchni na mikroskopie InfiniteFocus G4 firmy Alicona (parametry pomiaru - tab.5.10) uzębień naciętych

metodą Fellowsa oraz metodą Power Skiving. Przykłady wybranych wyników pomiarów zostały przedstawione na rys.5.38 - rys.5.47.

Badania mikrostruktury warstwy wierzchniej wybranych obszarów koła zębatego ze stali AMS 6308 po obróbce skrawaniem metodą Fellowsa i metodą Power Skiving zostały wykonane przy użyciu mikroskopu optycznego EPIPHOT 200 firmy Nikon. Badania były prowadzone zgodnie z wymogami właściwych norm branżowych i instrukcji Pratt&Whitney Rzeszów S.A. Wyniki zostały ujęte w tab.5.11 - tab.5.16 oraz na rys.5.51 - rys.5.55.

W podsumowaniu tych badań i analiz Doktorant stwierdził, że „... **akceptowalne stany mikrostruktury stali Pyrowear 53 uzyskano przy znaczącej redukcji czasu skrawania z użyciem metody Power Skiving w odniesieniu do próby kontrolnej - metody Fellowsa**”. Jest to także potwierdzeniem trafności zakresu wykonanych badań zastosowania metody Power Skiving, ukierunkowanej na wdrożenie przemysłowe.

W kolejnym etapie realizowanych prac badawczych Doktorant podjął sprawdzenie naprężeń własnych metodą dyfrakcji rentgenograficznej, występujących po procesie obróbki mechanicznej stali Pyrowear 53. Lokalizacja obszarów wykonywania pomiarów (w przedziale $\pm 3\text{ mm}$) naprężeń normalnych została przedstawiona na rys.5.56. Ważną rolę odgrywa odpowiednie przygotowanie próbek do badań deformacji sieci krystalograficznej, będących podstawą do obliczenia stanu naprężeń. Wyniki analizy dyfrakcyjnej i wyznaczone wartości naprężeń własnych po obróbce metodą Fellowsa oraz metodą Power Skiving zostały przedstawione w tab.5.17. Istotne są w tym przypadku dwa wnioski wynikające z tych badań:

- są to naprężenie ściskające, a więc korzystniejsze z punktu widzenia eksploatacji przekładni planetarnych;
- metoda Power Skiving nie wpływa negatywnie na osiągnięte wartości naprężeń własnych w porównaniu do metody Fellowsa przy znaczącej redukcji czasu obróbki skrawaniem uzębień.

Kontynuując kolejne badania Doktorant poddał nawęglaniu próbki ze stali Pyrowear 53 wykonane metodą Fellowsa oraz metodą Power Skiving w celu dyfuzyjnego nasycenia węglem warstwy wierzchniej podłoża. Próbki ze stali Pyrowear 53 przed procesem nawęglania zostały poddane procesowi oksydacji w celu zwiększenia efektywności procesu dyfuzji węgla do warstwy wierzchniej. W realizacji procesu nawęglania kół zębatych została wykorzystana standardowa procedura stosowana w Pratt&Whitney (tab.5.18). Badania warstwy nawęglonej oraz pomiary twardości były wykonane zgodnie z obowiązującymi normami i instrukcją w firmie Pratt&Whitney. Wyniki zostały obszernie udokumentowane w tab.5.19 oraz na rys.5.65 - rys.5.70.

W komentarzu do wyników tych badań Doktorant stwierdził, że:

- nie nastąpiło przekroczenie dopuszczalnej zawartości austenitu szcążkowego;
- nie zaobserwowano siatki węglików ani też utlenienia międzykrystalicznego;
- obliczeniowa twardość powierzchniowa dla poszczególnych obszarów weryfikacyjnych i lokalizacji określonych w rejonie koła tocznego osiągnęła wymagany poziom;
- nie zaobserwowano niekorzystnego wpływu złuszczenia obwiedniowego na głębokość oraz twardość warstwy nawęglonej.

Rozdział 6 - wpływ przytwierdzenia wiórów do powierzchni zębów na wybrane parametry warstwy wierzchniej (s.232 - s.272). W procesie nacinania uzębień metodą Power Skiving występują niekorzystne zjawiska zgrzewania lub przytwierdzenia wiórów do powierzchni zębów. Podjęte, kolejne badania miały na celu określenie wpływu tego zjawiska na proces dyfuzji węgla i twardość warstwy wierzchniej. Doktorant zaproponował oryginalną metodę badań, polegającą na wytworzeniu obszarów pokrytych miedzią, będących symulacją występowania wiórów na powierzchniach zęba, poddawanych procesowi nawęglania oraz obróbce cieplnej.



Plamy miedzi symulowały wióry występujące w różnych obszarach zębów koła zębatego (rys.6.7 - rys.6.11). Następnie koło zębate poddano procesom obróbki cieplno-chemicznej z zastosowaniem parametrów technologicznych dla stali Pyrowear 53. Na próbkach wyciętych z tych stref koła zębatego wykonano zgłady metalograficzne i poddano trawieniu w roztworze - Nital 5%. Badania mikrotwardości zostały wykonane metodą Vickersa zgodnie z odpowiednimi normami. Obszernie udokumentowane wyniki pomiarów zostały przedstawione na rys.6.16 - rys.6.53 oraz w tab.6.3 - tab.6.19.

W podsumowaniu tej części badań (podrozdział 6.4) Autor rozprawy potwierdził, że:

- wióry zgrzewane lub przytwierdzone do powierzchni koła zębatego mogą negatywnie oddziaływać na proces nawęglania, a tym samym na lokalne obniżenie twardości warstwy nawęglonej;
- ten niekorzystny efekt może być spotęgowany w przypadku, gdy wraz z wiórem do powierzchni zęba jest przytwierdzana miedź, która stanowi barierę dla procesu dyfuzji węgla;
- wióry o małych rozmiarach (nie jest podane o jakich rozmiarach) nie oddziałują negatywnie na twardość warstwy wierzchniej w rejonie koła podziałowego;
- należy jednak dążyć, aby w procesach obróbki mechanicznej efekty zgrzewania lub przytwierdzania wiórów nie występowały.

Rozdział 7 - analiza porównawcza kół zębatych wytworzonych w warunkach produkcyjnych metodą Fellowsa i Power Skiving (s.273 - s.302).

Po serii prac badawczych i analiz zostały wykonane dwie serie po 25 sztuk kół zębatych z zastosowaniem metody Powe Skiving oraz metody Fellowsa w Pratt&Whitney Rzeszów S.A. Następnie zostały poddane analizie wybrane parametry warstwy nawęglonej oraz odchyłki geometryczne wykonanych uzębień wg uprzednio zastosowanej procedury. Szczegóły dotyczące warunków tych badań zostały zwięźle, jednoznacznie przedstawione w tym rozdziale.

Do analizy statystycznej Doktorant wykorzystał program Python. Statystykami opisowymi były m. in.: średnia arytmetyczna, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. Do graficznej prezentacji Doktorant zastosował wykres wiolinowy rozkładu danych z zaznaczonymi wartościami kwartyli. Dla porównania średnich z prób był zastosowany test t-Studenta lub test Welcha. Wykonane zostały także testy jednorodności wariancji (test Bartletta) w wybranych próbach oraz test D'Agostino-Pearson'a na normalność rozkładu. Wyniki tych analiz zostały udokumentowane w tab.7.1 - tab.7.28 oraz na rys.7.1 - rys.7.8.

Wyniki tych analiz upoważniają do stwierdzenia, że metoda Power Skiving może być z powodzeniem zastosowana w produkcji kół zębatych do lotniczych przekładni planetarnych, wykonanych ze stali Pyrowear 53.

Rozdział 8 - Podsumowanie, wnioski końcowe, elementy oryginalne pracy (s.303 - s.311).

W podsumowaniu mgr inż. Robert Fularski przedstawił zwięźłą syntezę swoich dokonań z zakresu wykonanych badań i analiz uzyskanych wyników. Potwierdził słuszność sformułowanej hipotezy. Stwierdził, że: **..metoda Power Skiving umożliwia znaczną redukcję czasu obróbki przyjętych obiektów badań (kół zębatych satelitarnych FDGS wykonanych ze stali Pyrowear 53), w odniesieniu do czasów obróbki metodą Fellowsa oraz nie potwierdzono istotnego pogorszenia właściwości kół zębatych wytworzonych z użyciem metody Power Skiving określonych na podstawie wybranych parametrów geometrycznych oraz opisujących warstwę nawęgloną w odniesieniu do kół wytworzonych metodą Fellowsa”.**

Wnioski końcowe ujęte w 10-ciu punktach zostały sformułowane poprawnie na podstawie wykonanych, licznych i dobrze udokumentowanych badań.

Utylitarne znaczenie pracy zostało zawarte w ostatnim wniosku w zdaniu; **„przeprowadzone badania umożliwiły wdrożenie metody Power Skiving do produkcji seryjnej kół zębatych przekładni FDGS.**

Oryginalne osiągnięcia Doktoranta zawierają się w opracowaniu i zbudowaniu stanowisk badawczych umożliwiających realizację obszernego zakresu specjalistycznych badań, doborze parametrów procesu obróbki metodą Power Skiving oraz we wdrożeniu technologii w produkcji seryjnej kół zębatych do wysokoobciążonych, lotniczych przekładni planetarnych.

W kierunkach dalszych badań Doktorant proponuje kontynuację prac w trzech obszarach ważnych dla poszerzenia wiedzy o procesie obróbki i rozwoju metody Power Skiving, a mianowicie:

- badań zużycia ostrzy narzędzi stosowanych procesie obróbki metodą Power Skiving;
- opracowania modeli ujmujących zależność błędów obróbkowych i zmian mikrostruktury obrabianego materiału w funkcji parametrów skrawania metodą Power Skiving;
- opracowania modelu określającego wpływ kąta linii śrubowej β na dokładność wymiarowo- kształtową i topografię powierzchni po obróbce metodą Power Skiving.

Uwagi szczegółowe: w tekście występują nieliczne nieścisłości w niektórych sformułowaniach, a mianowicie:

- s.11 „... wstępne badania ... oraz analiza mikrostruktury po procesie skrawania pozwoliły na zakup obrabiarki...”; wyniki badań mogły być uzasadnieniem do zakupu, a nie pozwoleniem;
- s.16 „... można wyrazić przy pomocy podstawowych zależności...”; można wyrazić za pomocą... (za pomocą czegoś, przy pomocy kogoś);
- s.63 „topografia powierzchni może zmieniać się w zależności od skali jej obserwacji”; uważam, że zmienia się obserwowany obraz topografii powierzchni, a nie topografia powierzchni;
- s.80 „... noszące nazwę Prawa Braggów...”; wg encyklopedii fizyki (PWN 1972, t.I) jest to prawo Braggów-Wulfa;
- s.100 „... sposób i prędkość chłodzenia...”; powinno być „sposób i szybkość chłodzenia” ponieważ jest to wielkość skalarna, a nie wektorowa;
- s.146 „... stwierdzono, że wielkość parametru R_a ...”; powinno być „wartość parametru R_a ”;
- s.235 „... zmienność własności w warstwie wierzchniej...”; raczej „zmienność właściwości w warstwie wierzchniej”;

Generalnie stwierdzam, że tak obszerna i wieloaspektowa rozprawa doktorska została opracowana bardzo przejrzysto i starannie pod względem redakcyjnym. Badania zostały wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej, sformułowania i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Robert Fularski opracował spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu technologii kół zębatych, stosowanych w lotniczych przekładniach planetarnych. Wykazał, że dysponuje bardzo dobrze opanowaną wiedzą logiczno-matematyczną do rozwiązywania złożonych problemów technologicznych oraz realizacji badań i merytorycznej analizy uzyskanych wyników.

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do ważnego obszaru badawczego, związanego z rozwojem wyrobów i bezpieczeństwem statków powietrznych. **Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy**



nowości, a także potwierdzone w produkcji walory użytkowe. Uzyskane wyniki znacząco poszerzają wiedzę w zakresie technologii kół zębatach, stosowanych w wysokoobciążonych przekładniach planetarnych.

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Fularskiego w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Fularskiego nt.: „Wpływ konwencjonalnego dłutowania oraz innowacyjnej obróbki Power Skiving na kształtowanie cech jakościowych powierzchni poddanych obróbce oraz właściwości warstwy nawęglonej kół zębatach wykonanych ze stali Pyrowear 53” spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednolicony z dnia 29 września 2014 r. wraz z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r., a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 17 lutego 2023 r.



Józef Gawlik