

dr hab. inż. Damian Krenczyk, prof. PŚ
Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
ul. Konarskiego 18A
44-100 Gliwice

Gliwice, 15.03.2023r.

RECENZJA

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

Podstawa opracowania

Recenzję opracowano na podstawie pisma nr RM-530-05-02/2022
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej,
dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRZ

Obszar problemowy i aktualność tematyki rozprawy

Podjęta w rozprawie tematyka dotyczy zagadnień związanych zarówno z problematyką technologii wytwarzania, projektowania i konstrukcji maszyn, jak i eksploatacji. W szczególności Doktorant koncentruje się na problemie możliwości zastosowania wybranej technologii obróbki skrawaniem, z uwzględnieniem dodatkowych uwarunkowań, w produkcji kół zębatach znajdujących zastosowanie w wysokoobciążonych przekładniach lotniczych oraz jej oddziaływaniem na kolejne etapy procesu technologicznego. W centrum rozważań znajdują się zagadnienia weryfikacji wybranych etapów procesów obróbki skrawaniem pod względem zapewnienia wymaganych cech geometrycznych i jakościowych powierzchni obrabianych oraz stanu naprężeń własnych zarówno przed, jak i po procesach obróbki cieplno-chemicznej. Jest to niewątpliwie jeden z obszarów, w którym konieczne jest ciągłe doskonalenie i wdrażanie właściwych w danych warunkach metod obróbki oraz metod doboru optymalnych parametrów procesu technologicznego. Potrzeba ciągłego rozwoju w tym zakresie wynika w równym stopniu z wymagań stawianych przed producentami, dotyczących wydajności oraz konieczności redukcji kosztu wytwarzania, co z często podnoszonych w literaturze przedmiotu problemów z projektowaniem elementów poddawanych wysokim, cyklicznie zmiennym obciążeniami, gdzie istotną rolę odgrywają defekty warstwy wierzchniej związane z procesem obróbki mechanicznej. W tym kontekście Doktorant, biorąc pod uwagę możliwość zastosowania technologii Power Skiving w produkcji kół zębatach wysokoobciążonych

JK

przekładni lotniczych, trafnie wskazuje na potrzebą pogłębienia wiedzy o wybranej metodzie, w szczególności poszerzenia wiedzy związanej z możliwymi do zastosowania parametrami skrawania, zapewniającymi osiągnięcie wymaganych parametrów kształtowo-wymiarowych, topografii powierzchni czy mikrostruktury warstwy wierzchniej, przy jednoczesnym zagwarantowaniu oczekiwanego cyklu życia narzędzia obróbkowego. Ponadto, na podstawie przeglądu literatury przedmiotu, w aspekcie potrzeby adaptacji wysokowydajnej technologii obróbki i sterowania jej parametrami, Doktorant celnie wskazuje na konieczność zapewnienia odpowiednich charakterystyk powierzchni wytworzonej elementów węzła tarcia, pozwalających na uzyskanie wymaganej trwałości systemów tribologicznych oraz ich niezawodności.

Reasumując, recenzowana praca koncentruje się na rozwiązywaniu problemów wybranych zagadnień inżynierii procesów wytwarzania, dotyczy takich szczegółowych zagadnień, jak: procesy zarządzania przetwarzaniem materiałów, w tym wytwarzania produktów przez formowanie kształtu, zmianę wymiarów czy modyfikację powierzchni i kształtowania warstwy wierzchniej w procesach obróbki wiórowej i ścierniej. Podejmowane zagadnienia obejmują również aspekty efektywności i produktywności przedsiębiorstw oraz zarządzania wiedzą produkcyjną. Przedstawione w rozprawie zagadnienia oraz wspomniane obszary problemowe mieszczą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Wpisują się także z powodzeniem w zidentyfikowaną przez Doktoranta lukę badawczą, związaną z brakiem w dostępnych publikacjach naukowych oraz w materiałach producentów, kompleksowej wiedzy o metodzie Power Skiving, związanej z wymienionymi wyżej parametrami i zachodzącymi w warstwie wierzchniej zmianami związanymi z procesem skrawania oraz stanem powierzchniowych naprężeń własnych. W tym kontekście Doktorant prawidłowo formułuje cel pracy jako: *wykazanie, że zastosowanie technologii Power Skiving nie pogarsza wybranych cech wyrobu znamiennej dla uzębienia, zarówno przed jak i po procesach obróbki cieplno-chemicznej kół zębatach wykonanych ze stali Pyrowear 53 w odniesieniu do próby kontrolnej, którą stanowią koła zębata poddane procesowi skrawania z zastosowaniem metody Fellowsa.*

Wybór tematyki badawczej poruszanej przez Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie uważam za w pełni uzasadniony, a omawiane w niej treści są aktualne i wpasowują się w zagadnienia związane z dyscypliną inżynieria mechaniczna. Ponadto zaprezentowane wyniki mają duże znaczenie praktyczne.

Ocena rozprawy

Oceniana rozprawa jest bardzo obszerna, liczy aż 333 strony, składa się z 8 rozdziałów, w tym Wprowadzenia oraz listy cytowanej bibliografii liczącej 225 pozycji.

W pracy można wyróżnić trzy zasadnicze części. Część pierwsza obejmuje krótkie wprowadzenie (rozdział 1), przegląd literatury naukowej oraz sformułowanie hipotezy, celów naukowych i zakresu pracy (rozdziały 2–3). We wprowadzeniu przedstawiono podstawowe kwestie dotyczące wymagań, jakie muszą spełniać silniki i ich elementy składowe współcześnie eksploatowanych statków powietrznych. Wskazano na znaczenie przekładni w optymalizacji pracy układu sprężarki niskiego ciśnienia – wentylator oraz wymagania odnośnie do jakości wykonania. Doktorant w przejrzysty sposób przedstawił czynniki stanowiące motywację od podjęcia się badań nad wpływem, niestosowanej wcześniej w procesach wytwórcy, obróbki metodą Power Skiving na

kształtowanie cech jakościowych powierzchni oraz właściwości warstwy nawęglonej kół zębatach wykonanych ze stali Pyrowear 53. Wskazał na potencjał opisywanej metody oraz przyczyny, które powodowały, że dotychczas metoda ta nie była szeroko stosowana w produkcji seryjnej. Bardzo obszerny rozdział 2 poświęcono przedstawieniu, ważnych z punktu widzenia prowadzonych później przez Doktoranta badań, szeregu zagadnień dotyczących przedmiotu badań - przekładni, wybranych części składowych oraz procesów ich wytwarzania. Dużo uwagi poświęcono opisowi metody Power Skiving (złuszczenia obwiedniowego), zarówno w odniesieniu do charakterystyki samego procesu, narzędzi stosowanych w tej metodzie, jak również szeregu zagadnień praktycznych. Autor zawarł w tym rozdziale, bazując na wcześniejszych publikacjach, m.in. charakterystyki etapów skrawania wrębów międzyrębnych z uwzględnieniem procesu formowania wióra i wpływu kształtu na występujące obciążenia czy niekorzystne efekty w postaci przytwierdzenia lub zgrzewania wiórów do powierzchni obrobionych. Omówił aspekty dotyczące jakości geometrii i powierzchni uzębienia kół zębatach, naprężeń własnych i sposobów ich pomiaru, a także procesów obróbki cieplno-chemicznej wraz z metodami oceny ich efektywności. Mimo iż poruszane tutaj tematy są ważne z punktu widzenia później prowadzonych badań, uważam, że pewne podstawowe informacje mogłyby zostać pominięte bez szkody dla pracy. Na przykład, szereg przekształceń zależności w podrozdziale „Podstawowe pojęcia i zależności związane z metodą Power Skiving” mogły zostać pominięte i zredukowane do końcowego wyniku. Podobnie, szczegółowe opisy i definicje podstawowych parametrów dotyczących chropowatości, czy opisy dobrze znanych i szeroko stosowanych metod pomiaru twardości uważam za *nadmiarowe*. W rozdziale 3 trafnie i logicznie sformułowano cel oraz hipotezę pracy, odpowiadające zidentyfikowanym lukom badawczym w odniesieniu do potrzeby uzupełnienia wiedzy na temat oddziaływania wybranej metody skrawania na geometrię i topografię zęba oraz parametry warstwy wierzchniej uzębienia, a także wielkości charakteryzujące warstwę nawęglaną po zakończonych procesach. Podano również zakres rozprawy doktorskiej.

Druga, również bardzo obszerna część pracy (rozdziały 4–7) została przez Doktoranta poświęcona sformułowaniu programu i metodyki oraz szczegółowemu opisowi realizacji badań własnych. Zaproponowany, szczegółowy program badań (Rozdział 4), podporządkowany został możliwości osiągnięcia postawionego wcześniej celu pracy oraz wykazaniu słuszności przyjętej hipotezy badawczej. W jego zakresie wydzielono 4 główne części: badania wstępne kół zębatach obrabianych dwoma metodami, badania związane z określeniem wpływu wad będących wynikiem procesu skrawania na wybrane parametry warstwy nawęglonej, badania próbek pochodzących z serii produkcyjnych, prace końcowe, oraz odpowiadający im szereg zadań szczegółowych. Tak szeroki zakres badań zaplanowanych i zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej zasługuje na uznanie. Kolejne podrozdziały poświęcono wyczerpującemu przedstawieniu stanowisk badawczych do obróbki dwoma wybranymi metodami, przedmiotu badań (kół zębatach typu satelitarnego przekładni FDGS), narzędzi obróbkowych oraz wybranych przyrządów i maszyn pomiarowych. Określono także szeroki zakres parametrów jako zmiennych w procesie poszukiwania parametrów procesu charakteryzującego się wytworzeniem uzębienia o najmniejszych odchyłkach geometrycznych. Zaznaczono ważną kwestię dotyczącą wyboru materiału, z którego wykonywane są badane koła zębata w odniesieniu do wymogu ich pracy w wyższej temperaturze. Badania i wyniki zaprezentowane w rozdziale 5 obejmują obróbkę uzębienia próby kontrolnej (metodą Fellowsa) oraz

/Kd

dwóch prób z wykorzystaniem technologii Power Skiving. Warto zaznaczyć, że Doktorant podzielił tę fazę na dwa etapy – pierwszy dla szerokiego zakresu parametrów, oraz drugi, w którym możliwe było przyjęcie węższego zakresu modyfikacji parametrów (dla wejściowych parametrów obróbki wybranych w wyniku analizy rezultatów z etapu pierwszego). Uważam, że zaproponowany podział jest właściwy i pokazuje bardzo dobrą wiedzę i umiejętności sposobu wykorzystania odpowiednich metod badawczych. Następnie przeprowadzono analizę porównawczą parametrów kształtowo-wymiarowych uzębienia wytworzonego obiema metodami. Wyniki weryfikacji geometrycznej, na podstawie raportów odchyłek parametrów charakteryzujących uzębienie, pozwoliły na stwierdzenie, że dla próby kontrolnej spełnione zostały wszystkie założenia technologiczne. Podobne wnioski uzyskano dla pozostałych analizowanych parametrów (m.in. badań metalograficznych). Należy podkreślić kompleksowy i wyczerpujący charakter przeprowadzonych przez Doktoranta pomiarów i analiz. Dużym sukcesem jest także uzyskany znaczny spadek czasu obróbki, bez znaczącej zmiany parametrów geometrycznych. Pewnym mankamentem tej części pracy jest niewystarczające, w mojej ocenie, uzasadnienie podjęcia decyzji o zmianie geometrii narzędzia w odniesieniu do kąta pochylecia linii ostrza w drugim etapie badań. Doktorant odnosi się co prawda do potrzeby zniwelowania zjawiska „wywiniętego” materiału czy zgrzewania wiórów, lecz obserwacje dotyczące tych czynników opisano poprzednio dopiero w odniesieniu do *próby 4*, natomiast parametry wejściowe dla Etapu II przyjęto na poziomie wartości dla *próby 2*. Nie została także podana wprost wartość czasu obróbki uzyskana w *próbie 1* pierwszego etapu badań. Czy był on równy czasowi obróbki dla metody referencyjnej? W kolejnym podrozdziale na podstawie badania typografii powierzchni zobrazowano różnice pomiędzy typografią kół wykonanych dwiema metodami. Doktorant szczegółowo analizuje wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań dla różnych parametrów i obszarów. Formułuje w tym miejscu ważne spostrzeżenia i wnioski dotyczące możliwości pozytywnego wpływu uzyskanych parametrów nową metodą na procesy nawęglania dyfuzyjnego. Uzyskane wyniki pozwoliły także na sformułowanie cennych spostrzeżeń odnoszących się do wpływu zastosowanej metody na eksploatację powierzchni wytypowanych do badań części maszyn. Podobnym poziomem kompleksowości cechują się kolejno opisane badania mikrostruktury warstwy wierzchniej po etapie obróbki skrawaniem oraz charakteru naprężeń własnych. Na podkreślenie zasługuje wkład autora w wybór i opracowanie metody przygotowania próbek do pomiarów oraz zaproponowana procedura badań. Rozdział 5 kończy sprawozdanie z badań głębokości i twardości warstwy nawęglonej, co ponownie wymagało zaproponowania procedury badawczej uwzględniającej specyfikę wyrobu oraz jego funkcję. Rozdział 6 poświęcony został badaniom wpływu przytwierdzenia wiórów do powierzchni zębów na wybrane parametry warstwy nawęglonej. Zawarto w nim cenne i ciekawe wnioski i spostrzeżenia - wskazano na trudności w identyfikacji tego rodzaju zjawiska. Autor wskazuje na możliwy wpływ na procesy dyfuzji węgla w trakcie, ważnej w odniesieniu do wymaganych cech wyrobu końcowego, obróbki cieplno-chemicznej. Wskazuje na zidentyfikowaną lukę badawczą, dotyczącą niewielkiej liczby badań wspomnianego wpływu i uzyskiwanych parametrów dotyczących twardości w kontekście znaczenia tego rodzaju wpływu w procesach eksploatacji produktów przenoszących duże moce i poddawanych cyklicznie zmiennym obciążeniom. Badania prowadzone w tej części pozwalają na uzyskanie nowej wiedzy w omawianym obszarze i w mojej ocenie stanowią jedno z najważniejszych osiągnięć

Doktoranta. Wspomnę tylko o wnioskach dotyczących granicznych szerokości wiórów, dla których lokalna zmiana parametrów uzyskanych po obróbce cieplno-chemicznej staje się istotna z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych. Zabrakło mi tutaj jedynie dodatkowego komentarza do zaproponowanego sposobu „symulacji” obecności wiórów różnej wielkości, w odniesieniu do stopnia w jakim odzwierciedlane są w ten sposób rzeczywiste warunki, w których wiór zostaje wprasowany w powierzchnię podczas obróbki. Tę część pracy kończy rozdział 7, w którym przedstawiono wyniki analizy statystycznej wartości wytypowanych parametrów związanych z warstwą nawęglaną i odchyłkami geometrycznymi, uzyskanych dla kół zębatach wytworzonych porównywanymi metodami w warunkach produkcji seryjnej. Przyjęty zakres i program badań oraz wybrane, kluczowe parametry kół zębatach, pozwoliły na weryfikację stawianych przez Doktoranta szeregu hipotez statystycznych, dotyczących wpływu metody obróbki na wartości wybranych parametrów.

Trzecia część rozprawy obejmuje podsumowanie i sformułowanie wniosków końcowych. W rozdziale 8, Doktorant odnosząc się do uzyskanych wyników badań stwierdza, że metoda Power Skiving umożliwia znaczną redukcję czasu obróbki przyjętych obiektów badań, w odniesieniu do czasu obróbki metodą Fellowsa oraz, że nie potwierdzono istotnego pogorszenia właściwości kół zębatach wytworzonych z jej użyciem. Formułuje szereg wniosków ogólnych dotyczących wdrażanej metody, stanowiących poszerzenie wiedzy związanej z procesem skrawania oraz oddziaływaniem tego procesu na warstwę wierzchnią i właściwości warstwy po obróbce cieplno-chemicznej, pozwalające stwierdzić, że cel dysertacji został osiągnięty, a postawiona hipoteza naukowa została potwierdzona. Rozprawę kończy sformułowanie propozycji przyszłych prac badawczych w omawianym obszarze.

Reasumując, uważam, że kompozycja rozprawy, układ rozdziałów i podrozdziałów są poprawne oraz podporządkowane jasno postawionemu i konsekwentnie zrealizowanemu przez Doktoranta celowi. Lista cytowanych źródeł literaturowych obejmuje pozycje istotne i aktualne. Strona edycyjna pracy jest na bardzo wysokim poziomie, Autor nie ustrzegł się jedynie drobnych błędów natury językowej, które zaznaczyłem bezpośrednio w tekście rozprawy.

Oryginalne osiągnięcia rozprawy

W swojej pracy Doktorant poszukuje odpowiedzi na postawiony problem naukowy, dotyczący możliwości zastosowania wybranej technologii obróbki skrawaniem, z uwzględnieniem dodatkowych uwarunkowań, w produkcji kół zębatach wysokoobciążonych przekładni lotniczych oraz jej oddziaływaniem na kolejne etapy procesu technologicznego. Identyfikuje luki badawcze oraz odpowiadające im braki. Odpowiedzią na postawiony problem badawczy, są:

- zbudowane stanowisko badawcze wyposażone w obrabiarkę pozwalającą na realizację obróbki skrawaniem kół zębatach metodą Power Skiving do prowadzenia badań dotyczących doboru parametrów skrawania i parametrów technologicznych oraz wpływu procesu formowania wióra i jego kształtu na występowanie niekorzystnych efektów w postaci ich przytwierdzenia lub zgrzewania do powierzchni obrobionych,
- określenie geometrii narzędzia oraz procedury obróbkowej pozwalającej na znaczną redukcję czasu obróbki w porównaniu do konwencjonalnego dłutowania metodą Fellowsa,
- badania metalograficzne obrazujące wpływ obróbki kół zębatach metodą Power Skiving i metodą Fellowsa na defekty powierzchniowe oraz zmiany mikrostruktury warstwy wierzchniej,

- wybór metody przygotowania próbek oraz określenie wpływu rodzaju i parametrów obróbki na stan naprężeń własnych, pozwalających na minimalizację oddziaływania czynników zewnętrznych,
- określenie wpływu obróbki kół zębatych metodą Power Skiving i metodą Fellowsa na głębokość i twardość warstwy po obróbce cieplno-chemicznej,
- opracowanie procedury badawczej umożliwiającej określenie wielkości wiórów wpływających na wytypowane cechy opisujące warstwę nawęgloną wraz z wnioskami dotyczącymi granicznych szerokości wiórów, dla których lokalna zmiana parametrów uzyskanych po obróbce cieplno-chemicznej staje się istotna z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych,
- wdrożenie technologii Power Skiving do produkcji seryjnej kół zębatych FDGS znajdujących zastosowanie w wysokoobciążonych przekładniach lotniczych.

Należy podkreślić, że wyniki pracy odpowiadają aktualnym potrzebom przemysłu i poza wartością naukową mają znaczną wartość użyteczną. Biorąc pod uwagę oryginalne osiągnięcia pracy oraz jej wysoki poziom wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Uwagi ogólne i dyskusyjne

Poza nielicznymi uwagami zawartymi w poprzednich częściach recenzji można sformułować następujące uwagi ogólne i dyskusyjne:

- Dodatkowego komentarza wymagałaby kwestia uzasadnienia wyboru liczby kół zębatych (liczby próbek) poddanych badaniom opisanym w rozdziale 5. Czy istniały jakieś dodatkowe, poza tymi podanymi w pracy, czynniki wpływające na ten wybór? Podobne pytanie dotyczy próby kontrolnej.
- Pewnym ułatwieniem, w mojej ocenie porządkującym wyniki uzyskane w pracy, byłoby zamieszczenie w jednej tabeli wyników pomiarów dla analizowanych cech geometrycznych wraz z ich zestawieniem z wartościami tolerancji (dla wyników pomiarów zaprezentowanych w podrozdziałach 5.2–5.5).
- Proponuję w ramach przyszłych badań uwzględnić pogłębione badania wpływu rodzaju dysz na odprowadzanie wiórów podczas obróbki metodą Power Skiving. Ten aspekt został jedynie krótko skomentowany w opisie *próby 7* - Czy wymiana dysz nie spowodowałaby także pozytywnego efektu dla parametrów przyjętych w *próbie 6*?
- Uważam, że uzyskane wyniki i sformułowane wnioski w rozdziale 6 mogłyby posłużyć jako baza do wydania zaleceń dotyczących procesów kontroli jakości pod kątem występowania omawianych w tym rozdziale niekorzystnych zjawisk.

Uwagi szczegółowe

Poza uwagami natury ogólnej i dyskusyjnej można sformułować następujące uwagi szczegółowe:

- Podrozdział 2.2.1.2, str. 30 – w objaśnieniach do równania (2.18) błędnie oznaczono symbol długości wybiegu.
- Podrozdział 2.3, str. 68 – usterki we wzorach 2.59 oraz 2.60 ($i-1$ zamiast $i=1$).

- Podrozdział 4.5, str. 128 – powtórzone zostały ostatnie dwa zdania akapitu, podobnie str. 163 – zamieszczone zostały dwie wersje sformułowania analizy wyników.
- Podrozdział 5.5.1, str. 144, rysunki 5.6 i 5.7 – czy oba profilogramy odnoszą się do podstawy uzębienia wieńca lewego? (na rysunku 5.16 pominięto informację o stronie wieńca).
- Podrozdział 7.5, str. 293-294 – stwierdzenie „błędy ewolwenty F_a (...) były statystycznie różne” nie jest zgodne z wartościami podanymi w tabeli 7.19.
- Rozdział 9, pozycje [55] oraz [177] dotyczą tego samego artykułu.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione w niniejszej recenzji nieliczne uwagi mają głównie charakter dyskusyjny i nie podważają mojej wysokiej, pozytywnej oceny rozprawy. Na podstawie powyższej, szczegółowo uzasadnionej oceny, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego problemu naukowego, natomiast podejście Autora do zagadnień prezentowanych w pracy, sposób wyłożenia materiału, prowadzonych badań i opisy uzyskanych rezultatów dowodzą, że rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że opiniowana rozprawa mgr. inż. Roberta Fularskiego pt. **„Wpływ konwencjonalnego dłutowania oraz innowacyjnej obróbki metodą Power Skiving na kształtowanie cech jakościowych powierzchni poddanych obróbce oraz właściwości warstwy nawęglonej kół zębatach wykonanych ze stali Pyrowear 53”** spełnia warunki stawiane przez ustawę ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r., w odniesieniu do rozpraw doktorskich (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o dopuszczenie jej Autora do obrony.

Demian Krawiec