

Dr hab. inż. Mariusz Deja, profesor uczelni

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
Zakład Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
mariusz.deja@pg.edu.pl
tel.: 608-281-567

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Waldemara Dazia

Promotor: dr hab. inż. Witold Habrat, prof. Politechniki Rzeszowskiej

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Krupa

Tytuł rozprawy doktorskiej:

Analiza toczenia wykończeniowego uszczelnień dysków turbin ze spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu dla rodziny nowej generacji silników lotniczych (NGPF - *New Generation Product Family*) z użyciem płytki z ostrzem cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej

Gdańsk, luty 2024



1. Uwagi wstępne

Podstawę opracowania recenzji stanowi pismo nr RM-530-23-03/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, dr. hab. inż. Andrzeja Burghardta z dnia 30 października 2023 r. w sprawie wyznaczenia mojej osoby na recenzenta, oraz dołączony wydruk rozprawy doktorskiej.

Tytuł rozprawy doktorskiej: Analiza toczenia wykończeniowego uszczelnień dysków turbin ze spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu dla rodziny nowej generacji silników lotniczych (NGPF - *New Generation Product Family*) z użyciem płytki z ostrzem cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej.

Autor rozprawy doktorskiej: mgr inż. Waldemar Daż.

Promotor: dr hab. inż. Witold Habrat, prof. Politechniki Rzeszowskiej.

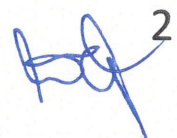
Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Krupa.

2. Tematyka rozprawy

Podjęta tematyka rozprawy doktorskiej jest ważna w aspekcie naukowym oraz przemysłowym. Obróbka komponentów mechanicznych, w tym uszczelnień stosowanych w silnikach lotniczych musi być przeprowadzana zgodnie z najwyższymi standardami i normami branżowymi w celu minimalizacji ryzyka awarii w trakcie eksploatacji. Złożoność procesu obróbki, a co za tym idzie wysokie koszty produkcji, związane są z niską skrawalnością superstopów żarowytrzymałych stosowanych na uszczelnienia wirujące stosowane w silnikach lotniczych nowej generacji (NGPF – *New Generation Product Family*), pracujących w strefie gorącej silnika. Superstopy żarowytrzymałe stanowią w obecnych konstrukcjach nawet do 50% masy turbinowego silnika lotniczego. Prawidłowy dobór geometrii narzędzi oraz parametrów technologicznych w przypadku obróbki wykończeniowej materiałów trudnoobrabialnych pozwala na właściwy przebieg procesu, uzyskanie założonych wymagań konstrukcyjnych oraz na uniknięcie wad i zmian strukturalnych w technologicznej warstwie wierzchniej (TWW). Przeprowadzone przez Doktoranta analizy i badania bezpośrednio mogą pomóc w spełnieniu tych wymagań poprzez dobór właściwej geometrii krawędzi skrawającej, tj. jej promienia i profilu oraz parametrów procesu.

Doktorant uwzględnił w swojej pracy doświadczenia innych badaczy z obszaru obróbki wykończeniowej materiałów trudnoskrawalnych oraz oceny TWW. Bardzo dokładny przegląd literatury i ograniczone dane literaturowe odnośnie m.in. wpływu geometrii krawędzi skrawającej na właściwości TWW skłoniły go do realizacji badań w tym zakresie, co było całkowicie uzasadnione. Standardy lotnicze szczegółowo określają parametry TWW podlegające ocenie oraz ich wartości graniczne w celu zapewnienia odpowiedniej niezawodności i trwałości komponentów silnika lotniczego. Wytwarzanie części krytycznych, a takimi są uszczelnienia wirujące, jest jednym z najtrudniejszych i najbardziej kosztownych obszarów produkcji części lotniczych, co bezpośrednio przekłada się na proces produkcyjny, a w szczególności obróbkę skrawaniem jak i nadzorowanie procesu i kontrolę jakości.

Zgodnie z wytycznymi standardów lotniczych, Doktorant dokonał właściwej ilościowej i jakościowej oceny parametrów TWW związanych m.in. z postacią i głębokością deformacji struktury, występowaniem tzw. białej warstwy, czy też wad powierzchniowych. Opracowana przez Doktoranta metodyka i uzyskane wyniki eksperymentalne z zastosowaniem narzędzi o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej, pozwoliły na znaczny, ok. 20% wzrost zatwierdzeń procesów zgodnie z wymaganiami standardów lotniczych, w wyniku ograniczenia liczby niezgodności występujących w raportach z badań metalograficznych powierzchni po obróbce. Wyniki badań Doktoranta mogą również posłużyć jako ogólne wytyczne do wytwarzania z materiałów trudnoobrabialnych elementów krytycznych w przemyśle lotniczym, co już ma miejsce dla materiałów pokrewnych ME16 i IN100 oraz



dla innych powszechnie stosowanych jak Inconel 718 czy 625. Potwierdza to wdrożeniowy, oprócz naukowego, charakter rozprawy.

3. Charakterystyka rozprawy

Praca liczy 130 stron i składa się z wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, siedmiu rozdziałów głównych, wykazu literatury (nie uwzględnionego w spisie treści) oraz streszczenia w j. polskim i angielskim. Po syntetycznym wprowadzeniu do tematyki pracy, obejmującym historię, budowę oraz materiały stosowane w budowie turbinowych silników lotniczych, Autor przedstawił w **rozdziale 2.** analizę przeglądu literatury z zakresu materiałów stosowanych w technice lotniczej oraz wymagań dla procesów obróbki części krytycznych stosowanych w silnikach lotniczych. W **rozdziale 3.** Doktorant opisuje cel i zakres pracy, wraz z hipotezą naukową wynikającą z analizy literatury i doświadczenia przemysłowego oraz zakres badań. **Rozdział 4.** obejmuje szczegółowy opis warunków badań doświadczalnych. **Rozdział 5.** zawiera wyniki oraz kompleksową ich analizę. Wnioski końcowe dotyczące problemu toczenia wykończeniowego uszczelnień dysków turbin ze spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu z użyciem płytki z ostrzem z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej zawiera **rozdział 6.** **Rozdział 7.** obejmuje aspekty wdrożeniowe wyników badań. Wykaz literatury liczy 110 pozycji.

Istotne informacje w aspekcie realizowanego tematu zawarte zostały szczegółowo w następujących rozdziałach:

Rozdział 1. Wprowadzenie - z prawidłowym przedstawieniem problematyki badań, zasadności tematu oraz struktury pracy.

Rozdział 2. Analiza literatury – scharakteryzowana w odniesieniu do materiałów stosowanych w technice lotniczej oraz szczególnych wymagań dla procesów obróbkowych komponentów krytycznych silników lotniczych. Doktorant przeanalizował również wyniki produkcyjne, które charakteryzowały się stosunkowo dużą liczbą niezgodności występujących w raportach z badań metalograficznych powierzchni po obróbce. Szczegółowy przegląd literatury oraz analiza danych z produkcji pozwoliły Doktorantowi na wyciągnięcie właściwych wniosków będących podstawą do postawienia celu pracy i hipotezy naukowej oraz określenia problemów naukowych i szczegółowego zaplanowania badań.

Rozdział 3. Cel i zakres pracy – prawidłowo zdefiniowane, wynikające bezpośrednio z dogłębnego przeglądu literatury przedstawionego w Rozdziale 2. Doktorant przedstawił hipotezę naukową związaną z istotnym wpływem modyfikacji geometrii KS z cBN na wskaźniki skrawalności i stan TWW w procesie toczenia wykończeniowego cienkościennych elementów ze spiekanego superstopu na osnowie niklu i kobaltu.

Rozdział 4. Warunki badań doświadczalnych – szczegółowo opisane w odniesieniu do materiału obrabianego, zastosowanych narzędzi i modyfikacji geometrii krawędzi skrawającej, stanowiska badawczego wraz z aparaturą pomiarową, oraz zakresu parametrów skrawania dobranych zgodnie z dobrą praktyką przemysłową i zaleceniami producentów narzędzi dla obróbki stopów z grupy HRSA (Heat Resistant Super Alloy).

Rozdział 5. Wyniki i analiza badań – z wielokierunkową analizą procesu skrawania superstopu na osnowie niklu i kobaltu z użyciem wybranych geometrii profili KS narzędzia z cBN. Dla każdej z geometrii KS, Doktorant przeprowadził badania wpływu parametrów skrawania na wybrane wskaźniki skrawalności z uwzględnieniem oddziaływania zużycia narzędzia w odniesieniu do wybranych wskaźników i stanu TWW.

Rozdział 6. Analiza i wnioski – z przedstawieniem końcowych wniosków naukowych i utylitarnych oraz z określeniem dalszych kierunków badań.



Rozdział 7. Wdrożenie wyników badań – potwierdzające również aplikacyjny, oprócz naukowego, charakter rozprawy.

Literatura – 110 pozycji literaturowych ściśle związanych z realizowanym tematem.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Doktorant postawił na podstawie analizy literatury i badań przemysłowych cel naukowy pracy, którym była analiza mechaniki toczenia wykończeniowego spiekane go superstopu na bazie niklu i kobaltu pod kątem wpływu modyfikacji geometrii krawędzi skrawającej narzędzia z cBN na składowe całkowitej siły skrawania, parametry chropowatości oraz zużycie ostrza i jego oddziaływanie na powyższe wskaźniki skrawalności oraz stan TWW. Celem praktycznym pracy było zwiększenie skuteczności zatwierdzeń procesów obróbki uszczelnień dysków turbin z analizowanego materiału dla rodziny nowej generacji silników lotniczych. Postawiona hipoteza naukowa dotyczyła istotnego wpływu modyfikacji geometrii KS z cBN na wskaźniki skrawalności i stan TWW w procesie toczenia wykończeniowego cienkościennych elementów ze spiekane go superstopu na osnowie niklu i kobaltu.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych i modelowych niewątpliwie upoważniają do stwierdzenia, że cel naukowy rozprawy został osiągnięty, a w konsekwencji również cel praktyczny związany z wdrożeniem wyników badań. Upoważniają również do przyjęcia postawionej hipotezy naukowej, oraz potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Pozytywnie i wysoko oceniam wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie oceny i interpretacji wskaźników skrawalności, w tym składowych sił skrawania, struktury geometrycznej powierzchni oraz zużycia narzędzia skrawające go. Pozwoliło to na przeprowadzenie analiz, które potwierdziły wpływ parametrów geometrycznych KS na mechanikę procesu skrawania badanego materiału w określonych warunkach kinematyczno-technologicznych. Badania i analizy przeprowadzone przez Doktoranta były konieczne z uwagi na specyfikę toczenia wykończeniowego uszczelnień dysków w silnikach lotniczych, przeprowadzanego z małą głębokością skrawania i posuwu, przy stosunkowo szybkim zużyciu narzędzia. Klasyczne modele i wzory do obliczania sił skrawania oraz parametrów chropowatości powierzchni w oparciu o geometrię narzędzia, kinematykę procesu i właściwości materiału obrabianego nie mogły być stosowane przez Doktoranta z uwagi na duże różnice w stosunku do zmierzonych wartości rzeczywistych. Rozprawa przyczynia się do lepszego poznania zjawisk w procesie toczenia wykończeniowego, zwłaszcza wpływu geometrii ostrza na strukturę geometryczną powierzchni oraz stan i jakość TWW komponentów mechanicznych wykonanych z superstopów. Jest to bardzo ważne zwłaszcza dla komponentów krytycznych, ponieważ obróbka wykończeniowa zwykle decyduje o końcowej jakości przedmiotu obrabianego w zakresie dokładności wymiarowo-kształtowej, chropowatości powierzchni i integralności powierzchni. Wszystkie te elementy mają istotny wpływ na awaryjność silnika lotniczego, a co za tym idzie - na bezpieczeństwo lotu. Doktorant wykazał, że kształtowanie parametrów i struktury TWW zależy od wielu, często subtelnych czynników. Różnica kilku do kilkunastu mikrometrów dla promienia zaokrąglenia profilu KS zdecydowała o wyeliminowaniu z użycia narzędzia o promieniu KS $R \geq 0,02$ mm i zastosowaniu płytki skrawającej o profilu KS R01. Badania Doktoranta pozwoliły również na uzyskanie większej wydajności obróbki.

Autor rozprawy przeprowadził wnikliwą analizę literatury kierunkowej z krytyczną dyskusją wyników badań w odniesieniu do dostępnych danych literaturowych.

Rozprawa doktorska niewątpliwie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego związanego z istotnym wpływem geometrii krawędzi skrawającej narzędzia z cBN na wskaźniki skrawalności i stan TWW w procesie toczenia wykończeniowego cienkościennych elementów ze spiekane go superstopu na osnowie niklu i kobaltu. Doktorant przyjął prawidłową metodykę badań z właściwym doбором stanowiska badawczego i aparatury pomiarowej wykorzystanej w badaniach

eksperymentalnych. Analiza wyników eksperymentalnych i modelowych pozwoliła na wysunięcie prawidłowych wniosków końcowych.

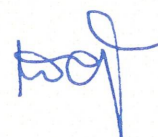
5. Uwagi do pracy

- 5.1. Hipoteza w mojej ocenie jest dobrze postawiona, chociaż sformułowanie kończące hipotezę, tj. „...oraz jego oddziaływania na strefy nieobrobione” wymaga doprecyzowania.
- 5.2. Na wybór wariantów geometrii krawędzi skrawającej wpłynęły wyniki zatwierdzeń dla narzędzi z ostrzem cBN przedstawione w rozdziale 2.4. Czy istniała praktyczna możliwość wyboru geometrii innych, niż przyjętych w badaniach? Jeżeli tak to jakich.
- 5.3. W pracy badano wpływ poszczególnych czynników na zmiany chropowatości. Co wpłynęło na wybór parametrów chropowatości Ra i Rz oraz wg jakiej normy były wyznaczone? Czy Autor pracy rozważył uwzględnienie w analizach również innych parametrów chropowatości, które mogłyby pomóc w lepszej charakterystyce obrabianej powierzchni? Dlaczego parametry powierzchniowe nie zostały uwzględnione w modelowaniu?
- 5.4. Wyznaczone modele matematyczne określone równaniami 1-20 powinny być przedstawione razem z zakresami zmienności parametrów wejściowych.
- 5.5. Przedstawienie zmian wskaźników zużycia za pomocą wartości średnich i rozstępów lub odchylenia standardowego, zamiast oddzielnie dla każdego przejścia, w mojej ocenie ułatwiłoby interpretację wyników.
- 5.6. Podsumowanie wniosków przedstawione na stronie 111 jest bardzo uogólnione i właściwie można by je przedstawić bez przeprowadzania badań, np. że zużycie narzędzia wpływa na trwałość narzędzia skrawającego. Jakie konkretne zalecenia przedstawiłby Doktorant firmie, która ma możliwość zastosowania narzędzi o modyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej?
- 5.7. Jakie zalecenia wskazałby Doktorant wytwórcy elementów krytycznych, który nie ma możliwości stosowania narzędzi z modyfikowaną geometrią KS?
- 5.8. Jakie zalecenia wskazałby Doktorant wytwórcy narzędzi z modyfikowaną geometrią KS?
- 5.9. Czy Doktorant rozważał dodatkową operację nieubytkową po toczeniu wykończeniowym, lub może nawet zamiast, powodującą odkształcenie plastyczne w TWW, a co za tym idzie utwardzenie i poprawę integralności powierzchni?
- 5.10. Doktorant stwierdza, że klasyczne modele i wzory do obliczania sił skrawania oraz parametrów chropowatości powierzchni w oparciu o geometrię narzędzia, kinematykę procesu i właściwości materiału obrabianego nie mogły być przez niego stosowane z uwagi na duże różnice w stosunku do zmierzonych wartości rzeczywistych. Jak można wyjaśnić taką sytuację? Czy według Doktoranta możliwa jest modyfikacja modeli klasycznych dla proponowanych geometrii KS, tak aby można je stosować skutecznie w praktyce?

6. Uwagi edytorskie

Praca napisana została bardzo starannie pod kątem edytorskim i językowym. Rysunki i wykresy są bardzo czytelne i przedstawiają wszystkie niezbędne opisy i informacje. Występują nieliczne błędy edytorskie i stylistyczne, np.:

- brak przecinków, np. 8₁₂ : brak przecinka przed „a”, 8₁₀: brak przecinka przez „że”;
- 8₁₂ : dwa razy „oraz”;
- przed liczbą i °C nie stawiamy spacji, np. 16₂ – jest „1430 °C”, powinno być „1430°C”;
- spacja powinna być wstawiana przed i po znakiem równości, np. 31₁₄ – jest „f=0,05”, powinno być „f = 0,05”;
- 77₁₅ : jest „wpływu” powinno być „wpływ”;



- 78 : jest „niższe wartości posuwu”, powinno być „mniejsze wartości posuwu”;
- rysunki od 5.27 do 5.34 powinny być większe dla lepszej czytelności.

7. Uwagi końcowe

Praca napisana została w sposób zrozumiały z uwypukleniem istotnych treści. Podane uwagi mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Mam nadzieję, że będą pomocne przy przygotowywaniu artykułów do renomowanych czasopism naukowych. Uwagi te nie pomniejszają wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej pracy.

8. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Umiejętnie wykorzystał stan istniejącej wiedzy z zakresu obróbki wykończeniowej komponentów krytycznych z superstopów do zastosowania w przemyśle lotniczym. Przeprowadzone badania pozwoliły na potwierdzenie **istotnego wpływu geometrii krawędzi skrawającej narzędzia z cBN na wskaźniki skrawalności i stan TWW w procesie toczenia wykończeniowego cienkościennych elementów ze spiekane go superstopu na osnowie niklu i kobaltu**. Praca stanowi oryginalny wkład do badań efektywności procesu toczenia nie tylko wybranego superstopu, ale również pokrewnych materiałów trudnoobrabialnych jak ME16 i IN100 oraz innych powszechnie stosowanych jak Inconel 718 czy 625. W ogólnej ocenie stwierdzam, że Pan mgr inż. Waldemar Daż w pełni zrealizował zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy, której tematyka jest zbieżna z badaniami prowadzonymi na świecie oraz z aktualnymi wymaganiami i oczekiwaniami wielu gałęzi przemysłu maszynowego, nie tylko lotniczego.

Doktorant klarownie sformułował problemy i hipotezę badawczą oraz osiągnął cel naukowy i praktyczny pracy na drodze prawidłowo zaplanowanych i przeprowadzonych badań eksperymentalnych i modelowych. **W mojej opinii praca zasługuje również na wyróżnienie z uwagi na jej nowatorski i użyteczny charakter oraz kompleksowy zakres badań i analiz. Tematyka pracy mieści się w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.**

Pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Waldemara Dazia do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Na podstawie przedstawionej opinii i w świetle dostępnej i znanej mi literatury naukowej stwierdzam, że praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przewidziane przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (tj. art. 187 ust. 1-3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i **może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

Gdańsk, 09.02.2024 r.


.....
/Mariusz Deja/

 6