

Dr hab. inż. Piotr NIEŚŁONY
Katedra Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole
tel: +48 77 449 8460
e-mail: p.nieslony@po.edu.pl

Opole, 12.01.2024r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Waldemara DAZIA pt.

„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 z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 30 października 2023 roku (RM-530-23-02/2023).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przemysł lotniczy jest jednym z głównych motorów napędowych nowoczesnego przemysłu wytwórczego, charakteryzującego się najbardziej innowacyjnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi jak i technologicznymi w obszarze budowy i wytwarzania elementów samolotów, w tym silników lotniczych. Ciągły rozwój wiedzy w zakresie materiałów, teorii przepływów i procesów spalania pozwala na opracowywanie nowych czy ulepszonych konstrukcji silników samolotowych. Poszukując rozwiązań zwiększających efektywność ekonomiczną, korespondujących z odpowiedzialną polityką środowiskową, inżynierowie lotnictwa cywilnego jak i wojskowego przyszłość silników samolotowych upatrują w nowoczesnych konstrukcjach napędów turbinowych. Rozwój silników turbinowych jest ściśle związany z możliwościami wytwórczymi przemysłu obróbkowego w zakresie kształtowania superstopów żarowytrzymałych. Panujące w strefie gorącej silnika turbinowego warunki pracy

determinują stosowanie materiałów zapewniających stabilną, pewną pracę w długich odcinkach czasu. Aktualnie tak wymagającym warunkom pracy są w stanie sprostać jedynie żarowytrzymałe stopy, głównie na podstawie niklu, kobaltu i żelaza, z fazami umocnieniowymi. Zgodnie z oczekiwaniami, ich wysoka wytrzymałość w szerokim zakresie temperatury wpływa na skrawalność, niestety znacząco utrudniając kształtowanie tego typu elementów maszyn obróbką ubytkową. Ten kluczowy aspekt kształtowania tego typu materiałów został zauważony w niniejszej dysertacji i stał się tematem prac badawczych realizowanych przez Doktoranta.

Doktorant, mgr inż. Waldemar Daż w swojej rozprawie doktorskiej zajął się bardzo ciekawą i aktualną tematyką kształtowania w procesie skrawania, a dokładniej toczenia wykończeniowego, spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu narzędziem z kubicznego azotku boru (cBN) o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej. Plan badań uwzględniał analizę wpływu aż trzech modyfikacji krawędzi skrawającej (specjalna faza oraz dwu różnych promieni zaokrąglenia krawędzi skrawającej) wprowadzonych na bardzo trudnym do kształtowania materiale narzędziowym. W aspekcie założonej tematyki badawczej, gdzie już w temacie pracy zaznaczono realizację badań z użyciem płytki z ostrzem z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej, zakres modyfikacji narzędzi skrawających został ustalony jak najbardziej poprawnie.

Produkcja lotnicza, jak i produkcja dla potrzeb przemysłu kosmicznego, jest jedną z najbardziej wymagających dziedzin wytwarzania. Główny aspekt kładziony jest na utrzymanie wysokich standardów jakościowych i zapewnienie niezawodności wyrobu. Z tego też powodu przemysł lotniczy wprowadził do swojej nomenklatury takie określenie jak „część krytyczna”, która obejmuje kluczowe systemy statków powietrznych. Te części podlegają szeregom standardów lotniczych (AS/EN 9100), których utrzymanie jest kluczowe i bezdyskusyjne. Doktorant, w swoim obszernym wprowadzeniu i analizie literatury omówił podstawowe kryteria podlegające ocenie w ramach monitorowania wytwarzania części krytycznych. Z tym też problemem związany jest istotny etap wdrażania technologii kształtowania części krytycznych, którym jest proces uzyskiwania zatwierdzeń wytycznych do wdrożenia technologii. Ten aspekt dysertacji został, w moim mniemaniu, całkowicie poprawnie przyjęty jako cel praktyczny pracy.

Zgodnie z założeniami Doktoranta celem naukowym pracy była wielozakresowa analiza mechaniki toczenia wykończeniowego spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu narzędziem z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej, która ma doprowadzić do uzyskania celu praktycznego pracy związanego ze zwiększeniem skuteczności zatwierdzania procesów obróbki uszczelnień dysków turbin ze spiekanego superstopu. Do osiągnięcia tego celu konieczne było przeprowadzenie szeregu zadań badawczych, gdzie w badaniach doświadczalnych ocenie podlegały warunki fizyczne procesu obróbkowego (siła

skrawania) i ich korelacja z dynamiką zużycia narzędzia oraz oddziaływaniem na kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej.

Zakres zaproponowanych i przeprowadzonych prac eksperymentalnych, przedstawionych w ocenianej dysertacji, należy ocenić bardzo wysoko, zarówno w ujęciu wiedzy pozyskanej z badań procesu jak i umiejętności nabytych w trakcie jej implementacji do realnego środowiska technologicznego.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że:

- Poznanie wpływu modyfikacji krawędzi skrawającej supertwardego materiału narzędziowego, w odniesieniu do kształtowania materiału superstopu żarowytrzymałego wytwarzanego na drodze metalurgii proszków, jest oczekiwane przez przemysł maszynowy, głównie w aspekcie poszukiwania racjonalnej i akceptowanej przez przemysł lotniczy jak i kosmiczny technologii wytwarzania części krytycznych z trudnoskrawalnego materiału konstrukcyjnego.
- Ze względu na istotny wpływ parametrów obróbkowych, warunków technologicznych oraz stereometrii ostrza narzędzia skrawającego na skrawalność tak specyficznego superstopu żarowytrzymałego, poznanie ich wpływu na wybrane wskaźniki skrawalności, jak również oddziaływanie na stan technologicznej warstwy wierzchniej, jest jak najbardziej cenne i uzasadnione.
- Przemysł maszynowy, w szczególności przemysł lotniczy i kosmiczny, dąży do zmaksymalizowania efektywności produkcji elementów z tego typu materiałów, a wiedza z zakresu kształtowania tych stopów wraz z informacjami o trwałości narzędzi i jakości wytwarzanych powierzchni jest poszukiwana i bardzo cenna.

W tym kontekście uważam, że wybór tematu rozprawy dotyczącej analizy toczenia wykończeniowego uszczelnień dysków turbin ze spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu dla rodziny nowej generacji silników lotniczych z użyciem płytki z ostrzem z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej jest jak najbardziej trafny i uzasadniony.

2. Zawartość pracy

Rozprawa zawiera 130 stron i składa się z 7 rozdziałów. Rozdziały są czytelne, logicznie ułożone, a większość z nich zawiera szereg dobrze zdefiniowanych podrozdziałów.

Praca jest dobrze zilustrowana, zawiera 69 rysunków oraz 14 tabel. Spis literatury jest bardzo obszerny, zawiera 110, poprawnie cytowanych w pracy i dobrze dobranych pozycji. Doktorant wykazał w literaturze rozprawy doktorskiej swój ciekawy dorobek naukowy podając 2 artykuły, których był współautorem. Podkreślić należy, że są to artykuły publikowane w

dobrych czasopismach o tematyce całkowie zbieżnej z tematyką swojej rozprawy doktorskiej.

Dysertacja rozpoczyna się spisem treści oraz wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów. Wykaz skrótów okazał się bardzo pomocny w zrozumieniu treści przekazywanej przez Autora, gdzie nie zawsze skrót (akronim) jest ogólnie znany, a jego rozwinięci wynika z pobliskiej treści tekstu. Pierwszy, numerowany rozdział pracy doktorskiej jest wprowadzeniem, gdzie Doktorant w bardzo ciekawy i wystarczający, w odniesieniu do realizowanej tematyki pracy, sposób przedstawił historię rozwoju turbinowych silników lotniczych i ich budowę, nawiązując do powodu czy też konieczności stosowania żarowytrzymałych stopów i ich wymagającej, dokładnej obróbce mechanicznej.

W drugim rozdziale rozprawy Doktorant przedstawił studium literatury, które można uznać za analizę zagadnienia dzieląc ten obszar wiedzy na pięć głównych podrozdziałów. Przedstawione dane literaturowe dotyczą: charakterystyki i właściwości superstopu na bazie niklu i kobaltu, wymagań dla procesów obróbki części krytycznych, analizy prac naukowców zajmujących się obróbką skrawaniem materiałów lotniczych (rozbudowana, szczegółowa kwerenda wielu istotnych prac badawczych), analizy wyników produkcyjnych nawiązujących do danych firmy macierzystej Doktoranta, czyli Pratt & Whitney Rzeszów (PWR) oraz wniosków z analizy literatury. Informacje te zostały również wykorzystane w dysertacji podczas prezentowania założeń, co do planu badawczego i zakresów realizacji pracy badawczej. Wyraźnie została podkreślona istotność tej tematyki badawczej i jej aplikacyjny charakter.

Trzeci rozdział rozprawy zawiera jej cel i zakres. Zostało to przedstawione w zwarty i czytelny sposób. Można zauważyć doświadczenie Doktoranta w formułowaniu zakresu badań doświadczalnych, co niewątpliwie wynika z nabytego doświadczenia podczas realizacji badań eksperymentalnych czy projektów wdrożeniowych w firmie macierzystej. Wartym podkreślenia faktem jest opracowanie schematu graficznego zakresu pracy, który poprzez swoją czytelną, algorytmiczną formę ułatwia zrozumienie kolejności realizacji poszczególnych etapów badań i ich powiązań z oczekiwanymi rezultatami.

Warunki własnych badań doświadczalnych, w szczególności aspekt dotyczący materiału obrabianego, zastosowanego narzędzia i modyfikacji jego geometrii, czy też samego stanowiska badawczego, zakresu parametrów skrawania wraz z szczegółową metodyką badań, zostały rozwinięte w rozdziale czwartym.

Najbardziej obszernym rozdziałem pracy jest rozdział piąty dotyczący analizy wyników badań. Wyniki badań przedstawiono w czterech podrozdziałach z podziałem na badania związane z analizą i modelowaniem składowych siły skrawania, modelowaniem parametrów chropowatości i topografii powierzchni, zużyciem ostrza oraz wpływem zużycia na wskaźniki skrawalności i stan TWW.

Wnioski poznawcze przedstawił Doktorant w przemysłanej, wypunktowanej formie w rozdziale szóstym. Tutaj również Autor rozwinął swoje uwagi i spostrzeżenia odnośnie dalszych prac badawczych w tej tematyce. Cała koncepcja badań realizowanych w specyficznych warunkach procesu toczenia, korespondującego z warunkami produkcyjnymi, miała na celu pozyskanie informacji o kierunkach modyfikacji procesu pozwalających na jego wdrożenie do produkcji w firmie PWR z zapewnieniem akceptowalnych wartości kryterium zatwierdzeń do wdrożenia. Ten zakres pracy przedstawił Doktorant w ostatnim, siódmym rozdziale.

Dysertację zamykają nienumerowane rozdziały obejmujące spis literatury, streszczenie, również w języku angielskim oraz wykaz rysunków.

3. Uwagi szczegółowe dotyczące pracy

1. W podrozdziale 2.3 dysertacji Autor przedstawia i analizuje literaturowe informacje odnoszące się globalnie do obróbki skrawaniem materiałów lotniczych. Ta bardzo wnikliwa i wielowątkowa analiza uzmysławia ogrom problemów z jakimi muszą się zmierzyć technolodzy podczas kształtowania różnego typu materiałów lotniczych. Jednak w przedostatnich akapitach tego podrozdziału Doktorant rozpoczął omawiać metodę RSM (ang. *Response Surface Methodology*). Czy można doprecyzować, jaki był cel wprowadzenia tego omówienia w tym rozdziale? Jak chciano tym zagadnieniem nawiązać do problematyki obróbki skrawaniem materiałów lotniczych omawianych w tym rozdziale?
2. W wielu obszarach swojej pracy Doktorant nawiązuje do problematyki kształtowania trudnoobrabialnych materiałów lotniczych poprzez określanie wskaźników skrawalności. Mamy tego przykład w hipotezie badawczej i wielokrotnie w rozdziale obejmującym wyniki i analizę badań. Czy nie warto byłoby jeszcze usystematyzować jaki rodzaj wskaźników skrawalności Doktorant wybrał do oceny kształtowania, metodą obróbki ubytkowej, obrabianego superstopu? Jak mają się te wskaźniki do procedury ustalania wytycznych do wdrożenia technologii, akceptowalnych w przemyśle lotniczym?
3. W podrozdziale 5.1 analizowano i modelowano składowe całkowitej siły skrawania. Już na wstępie Doktorant wskazał, że „w trakcie pomiaru obserwowano dużą amplitudę wartości mierzonych składowych siły skrawania”. Genezę ich powstawania tłumaczono zjawiskiem tworzenia się, w tego typu materiałach, uskoków na granicach ziaren, blokujących przemieszczanie się płaszczyzny poślizgu w strefie tworzenia wióra. Sam ten fakt jest możliwy do zaakceptowania, jednak brakuje w pracy precyzyjniejszego opisanie metodologii wyznaczania, przykładowo, średnich wartości składowych siły skrawania w ramach zaplanowanych eksperymentów. W tabeli 5.1 przedstawiono już

opracowane wyniki pomiarów siły, bez podania adekwatnych parametrów statystycznych (przykładowo: odchylenie standardowe, rozrzut, wartości skrajne, kwartyle itp.), które pozwoliłyby lepiej oszacować zgodność modeli matematycznych wyznaczonych w dalszej części tego podrozdziału. Czy tego typu opracowania statystyczne były prowadzone? Jeżeli tak, to jakie parametry wyznaczano?

4. W dysertacji Doktorant wyznaczył szereg modeli matematycznych ujmujących wpływ parametrów technologicznych na składowe siły skrawania, parametry chropowatości itp. Zgodnie z założeniami zakres stosowności tych modeli odpowiada zakresom parametrów wejściowych ocenianych w badaniach eksperymentalnych (warto byłoby to wyraźnie podać przy opisie wzorów). Czy Doktorant zastanawiał się nad możliwą ekstrapolacją wyników poza zakres badany lub w jakim zakresie taka ekstrapolacja byłaby wiarygodna? Byłby to ciekawy obszar poszukiwań racjonalnych rozwiązań technologicznych.
5. Zużycie ostrza Doktorant oceniał w oparciu o parametry VB_{Bmax} oraz VB_N . Czy parametr VB_{Bmax} był wyznaczany na narożu ostrza czy na prostym odcinku krawędzi skrawającej? Czy nie byłoby poprawniej definiować go jako VB_C ?
6. Bardzo ciekawy wniosek roboczy zapisał Autor w podsumowaniu podrozdziału 5.3, gdzie zauważył, że ostrze o mniejszym promieniu zaokrąglenia („ostra” geometria R01) przyczynia się do mniejszego umocnienia powierzchni obrobionej. Czy udało się to wykazać w badaniach mikrotwardości lub czy widoczne jest to na obrazach mikrostrukturalnych (rys.5.44)?
7. Analizę mikrostruktury materiału obrabianego po toczeniu zmodyfikowanymi narzędziami w funkcji ich zużycia przedstawił Doktorant w podrozdziale 5.4.3. Wskazano, że analizę prowadzono w ujęciu instrukcji MCLM E-166 suplement A. Jakie dokładnie parametry, w tym przypadku, muszą być oceniane i utrzymane ilościowo, a jakie jakościowo, aby spełnić wymagania tej instrukcji? Pytanie to podyktowane jest wielokrotnym stwierdzeniem Doktoranta, że w ujęciu tej instrukcji „wygląd nie budzi zastrzeżeń” lub podobnymi, mało jednoznacznymi.
8. Doktorant wykazał we wnioskach, że akceptowalnym rozwiązaniem, w ujęciu normatyw produkcyjnych funkcjonujących w przemyśle lotniczym, jest wykorzystanie narzędzia o profilu R01, tj. zaokrąglona krawędź skrawająca o najmniejszym testowanym promieniu. Czy na podstawie przeprowadzonych badań jak i posiadanej wiedzy w ramach swojej praktyki produkcyjnej nasuwają się pomysły na modyfikację tej geometrii, która pozwoliłaby jeszcze lepiej dopasować ostrze do oczekiwanych efektów produkcyjnych?

4. Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest napisana starannie. Właściwie nie znalazłem w niej większych błędów edytorskich (drobne błędy interpunkcyjne, nieścisłość w rozwinięciu akronimu RSM, gdzie raz M opisywano jako *Methodology*, a kolejny raz jako *Method*). Rozdziały redagowane są czytelnie, zarówno pod względem stylistycznym jak i edycyjnym. W pracy zachowano jednorodny i dobrze przemyślany układ graficzny, co ułatwia jej zrozumienie. Czytając poszczególne rozdziały widoczna była szczególna staranność w zakresie estetyki informacji graficznych (rysunków, wykresów itd.). Doktorant próbował, z sukcesem, przedstawić w formie przemyślanych, własnych grafik wyniki swoich badań eksperymentalnych, czego przykładem mogą być interesujące wizualnie jak i jakościowo wykresy na rys.5.2, 5.6 itd. Pozwoliło to podnieść atrakcyjność szaty graficznej pracy, a tym samym istotnie zwiększyło jej czytelność.

5. Ocena końcowa

Powyższe uwagi krytyczne nie podważają istotnej treści merytorycznej rozprawy ani nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, który udowodnił, że posiada dużą wiedzę z zakresu obróbki ubytkowej, w szczególności obróbki skrawaniem oraz wiedzę praktyczną związane z prowadzeniem procesów kształtowania ubytkowego trudnoskrawalnych materiałów lotniczych w warunkach produkcji przemysłowej. Dodatkowo Doktorant wykazał się znacznymi umiejętnościami z zakresu planowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych, jak i opracowania i merytorycznej analizy ich wyników.

Uważam, że uwagi zawarte w recenzji mogą być przedmiotem analiz w dalszej działalności badawczej i publikacyjnej Doktoranta. Podkreślam, że część uwag ma charakter pytań i sugestii do wykorzystania na przyszłość. Ponadto stwierdzam, że postawiony w pracy główny cel naukowy oraz wynikający z tego cel praktyczny zostały osiągnięte.

Doktorant wykazał się dużą praktyką w operowaniu warsztatem badawczym, a swoje eksperymenty prowadził w przemyślany, racjonalny sposób. Jak w każdych, dobrze prowadzonych badaniach eksperymentalnych także i w tym przypadku Autor zauważył niedociągnięcia i braki, które proponuje uzupełnić w ramach dalszych badań. Jest to godna podkreślenia pozytywna cecha naukowca, który wie i rozumie, że nie ma możliwości takiego zaplanowania eksperymentu, aby całkowicie wyczerpać problem badawczy.

Podsumowując należy stwierdzić, iż wśród wielu nowych zagadnień spotykanych w nowoczesnej obróbce skrawaniem trudnoskrawalnych materiałów konstrukcyjnych Pan mgr inż. Waldemar Daż potrafił znaleźć istotny, z punktu widzenia naukowego, użyteczny jak i aplikacyjny, obszar badawczy, w ramach którego możliwe stało się określenie jak

najbardziej racjonalnej metody kształtowania toczeniem uszczelnień dysków turbin ze spiekanego superstopu na bazie niklu i kobaltu dla rodziny nowej generacji silników lotniczych z użyciem płytek z ostrzem z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej.

Wynikiem pracy Doktoranta jest dysertacja, która stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a zawarte w niej informacje potwierdzają dużą, ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych. **Potwierdzam, że przedstawiana do oceny rozprawa doktorska wpisuje się, w zakresie zaprezentowanej wiedzy teoretycznej jak i badań naukowych, w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.**

6. Wniosek końcowy - konkluzja

Całość rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Waldemara DAZIA pt. „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 z cBN o zmodyfikowanej geometrii krawędzi skrawającej” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, zarówno w aspekcie technologicznym jak i praktycznym, a przedstawione w dysertacji rozwiązanie problemu naukowego potwierdza wiedzę Doktoranta z inżynierii mechanicznej i wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa doktorska opatrzona jest odpowiednim streszczeniem w języku angielskim. Wypełnienie tych wymogów umożliwia sformułowanie wniosku o spełnieniu warunków określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna w Politechniki Rzeszowskiej o **przyjęcie tej rozprawy i o dopuszczenie Autora**, Pana mgra inż. Waldemara DAZIA, do publicznej obrony w ramach **dyscypliny inżynieria mechaniczna**.

