

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

Opole, 08.09.2017r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina PŁODZIENIA pt.

„Wpływ zarysu i kąta pochylenia krawędzi skrawającej oraz sposobu chłodzenia na wysokowydajną obróbkę stopu AlZn5.5MgCu”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 13 lipca 2017 roku (RM-530-12-03-2016).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Nowoczesny przemysł maszynowy, zwłaszcza lotniczy, dąży do jak największego obniżenia masy wytwarzanych wyrobów przy zachowaniu lub polepszeniu ich funkcjonalności. Powszechnie stało się wykorzystanie w tym celu, jako materiałów obrabianych, nowoczesnych stopów aluminium. Zastosowanie tych materiałów wynika również z korzystnych właściwości mechanicznych i termicznych. Niestety lotnicze części o złożonych kształtach, wykonywane ze stopów aluminium, wytwarza się niejednokrotnie w małych seriach. Ze względów ekonomicznych części te coraz częściej wykonywane są jako jednolite z pełnego materiału w procesie skrawania. Wymaga to usunięcia dużego lub nawet bardzo dużego naddatku materiału. To wymaga czasu i energii. Dodatkowo konstrukcje lotnicze tego typu charakteryzują się ściankami, uźebrowaniem o niewielkiej grubości. Intensywna obróbka skrawaniem może doprowadzić do deformacji takich elementów, a tym samym prowadzić do zniszczenia kosztownego, obrabianego przedmiotu.

Jak efektywnie obrabiać tego typu konstrukcje? Jedną z metod obróbki jest wykorzystanie obróbki wysokowydajnej HPC. Obróbka ta ma szczególne znaczenie przy frezowaniu, głównie na etapie obróbki zgrubnej lub kształtującej. Obróbka wysokowydajna charakteryzuje się znaczną redukcją czasu i ograniczeniem kosztów wytwarzania w porównaniu z obróbką konwencjonalną. Posiada jednak ograniczenia, do których można między innymi zaliczyć: duże wymagania, co do

sztynności układu OUPN, oprzyrządowania czy zakresu parametrów technologiczny frezarki. Dodatkowo ten typ produkcji wymaga stosowania narzędzi dostosowanych do HPC, głównie o zwiększonej sztywności i pozwalających na poprawne kształtowanie wiórów i ich ewakuację z strefy obróbki. Narzędzia, frezy są istotnym elementem tego układu roboczego. Z tego też względu Pan mgr. inż. Marcin Płodzień pragnął się zająć tą tematyką w ramach swojego doktoratu. Jest to duże wyzwanie inżynierskie, które mimo spodziewanych trudności zostało przez Doktoranta podjęte, czego efektem jest przedłożona do recenzji rozprawa doktorska ujmująca wpływ zarysu i kąta pochylenia krawędzi skrawającej oraz sposobu chłodzenia na wysokowydajną obróbkę stopu AlZn5.5MgCu .

Jak już wspomniano, Doktorant mgr inż. Marcin Płodzień w swojej rozprawie doktorskiej zajął się bardzo ciekawą i aktualną tematyką wysokowydajnego frezowania stopu aluminium zmodyfikowanymi, monolitycznymi frezami walcowo-czołowymi. Materiałem obrabianym był stop aluminium do przeróbki plastycznej AlZn5.5MgCu , często wykorzystywany w lotniczych konstrukcjach wytrzymałościowych. Badania prowadzono dla trzech zestawów frezów charakteryzujących się zmiennym zarysem krawędzi skrawającej, zmiennym kątem pochylenia krawędzi skrawającej i różnym sposobem doprowadzenia cieczy chłodząco – smarującej. Przyjęty przez Doktoranta zakres parametrów technologicznych pozwolił na przeprowadzenie pełnych badań doświadczalnych w oparciu o plan statyczny trójpoziomowy kompletny. Taki plan pozwolił na uzyskanie szeregu modeli matematycznych w postaci funkcji wielomianowych. W aspekcie założonej tematyki badawczej, gdzie już w temacie pracy zaznaczono chęć oceny wpływu makrogeometrii narzędzia oraz sposobu chłodzenia na wysokowydajną obróbkę, ustalenie takiego planu jest jak najbardziej poprawne.

Przeprowadzone przez Doktoranta kompletne badania doświadczalne, wymagające opracowania i wykonania szeregu specjalistycznych, dedykowanych frezów monolitycznych, mają istotne znaczenie w lepszym poznaniu procesów zachodzących podczas obróbki HPC stopu aluminium AlZn5.5MgCu , przy zdefiniowanym zakresie zmienności parametrów technologicznych.

Doktorant, na podstawie zawartych w swojej pracy informacjach literaturowych, dotyczących zarówno skrawalności stopów aluminium, narzędzi do obróbki HPC, kinematyki tego procesu jak i jego stabilności, sformułował i przedstawił główne założenia i cel pracy.

Podsumowując mgr inż. Marcin Płodzień w swoich badaniach skoncentrował się na określeniu wpływu zarysu i kąta pochylenia krawędzi skrawającej oraz sposobu chłodzenia monolitycznych frezów walcowo-czołowych na wysokowydajną obróbkę stopu AlZn5.5MgCu .

Zakres zaproponowanych i przeprowadzonych prac, przedstawionych w ocenianej dysertacji, jest jak najbardziej uzasadniony, ponieważ:

- Wysokowydajna obróbka HPC stopów aluminium w dużych konstrukcjach lotniczych jest coraz częściej spotykanym sposobem kształtowania tego rodzaju elementów maszyn.
- Ustalone przez Doktoranta kompleksowe kryteria oceny modyfikacji frezów monolitycznych, w oparciu o badania eksperymentalne są jak najbardziej adekwatne z oczekiwaniami przemysłowymi.

- Przemysł lotniczy dąży do zmaksymalizowania efektywności produkcji monolitycznych elementów o dużych nadadkach obróbkowych, a przeprowadzone przez Doktoranta badania pozwalają na ocenę przydatności zmodyfikowanych narzędzi i ustalenie racjonalnych parametrów ich wykorzystania.

W tym kontekście uważam, że wybór tematu rozprawy dotyczącej oceny wpływu zarysu i kąta pochylenia krawędzi skrawającej oraz sposobu chłodzenia monolitycznych frezów walcowo-czołowych na wysokowydajną obróbkę stopu AlZn5.5MgCu jest jak najbardziej trafny i uzasadniony.

2. Zawartość pracy

Rozprawa jest obszerna, zawiera 134 strony i składa się z 6 rozdziałów. Rozdziały są czytelnie, logicznie ułożone, a większość z nich zawiera szereg dobrze zdefiniowanych podrozdziałów.

Praca jest bogato ilustrowana, głównie w części prezentującej wyniki badań eksperymentalnych. W sumie zawiera 116 rysunków oraz 36 tabel. Spis literatury jest bardzo obszerny i ujmuje 163 z reguły dobrze dobranych i cytowanych w pracy pozycji. Doktorant wykazał w literaturze rozprawy doktorskiej swój istotny dorobek naukowy podając aż 15 artykułów, których był współautorem. Podkreślić należy, że są to artykuły punktowane, publikowane w znaczących polskich czasopismach. Wiele z nich było również prezentowane na konferencjach tematycznych.

Pierwszy rozdział dysertacji jest wprowadzeniem, w którym Autor przedstawił w zwięzły sposób powód podjętej problematyki badawczej i strukturę pracy podając krótką charakterystykę poszczególnych rozdziałów. Wyraźnie została podkreślona istotność tej tematyki badawczej i jej aplikacyjny charakter.

W drugim rozdziale rozprawy Doktorant przedstawił studium literatury, które można uznać za analizę zagadnienia dzieląc ten obszar wiedzy na dziewięć głównych podrozdziałów. Przedstawione dane dotyczą aktualnego stanu wiedzy z wyraźnym ukierunkowaniem na informacje, które zostały wykorzystane w dysertacji podczas dalszej analizy danych eksperymentalnych.

Trzeci rozdział rozprawy zawiera jej cel, hipotezę i zakres. Zostało to przedstawione w zwarty i jednoznaczny sposób zamykając plan badawczy czytelnym schematem. Można zauważyć doświadczenie Doktoranta w formułowaniu zakresu badań doświadczalnych, co niewątpliwie wynika z nabytego doświadczenia podczas realizacji badań eksperymentalnych.

Własne badania doświadczalne zostały przedstawione w obszernym czwartym rozdziale. Doktorant szczegółowo przedstawił swoje stanowiska badawcze wraz z najbardziej istotnymi ich parametrami. Dodatkowo w tym rozdziale zamieszczono opisy i rysunki oprzyrządowań zaprojektowanych dla potrzeb zaplanowanych badań eksperymentalnych. Dużo miejsca poświęcono opisowi makrogeometrii zaprojektowanych zestawów frezów. Jest to w końcu główny ciężar tej pracy. W odpowiednich tabelach zaprezentowano czytelne zdjęcia i rysunki zaprojektowanych frezów o zmiennym zarysie i kącie pochylenia krawędzi skrawającej.

Należy nadmienić, że w ramach tego rozdziału Doktorant dokonał również oceny wyników badań doświadczalnych. Wyniki badań przedstawiono w trzech głównych grupach oceniając wpływ zarysu

krawędzi skrawającej, wpływ jej kąta pochylenia oraz wpływ sposobu chłodzenia na zmianę wybranych parametrów procesu.

Podsumowanie i wnioski Doktorant przedstawił w rozdziale piątym. Oddzielnym, szóstym rozdziałem jest spis literatury wykorzystanej w dysertacji. Praca zawiera również streszczenie w języku polskim oraz angielskim oraz bardzo przydatny wykaz ważniejszych symboli i akronimów.

3. Uwagi szczegółowe dotyczące pracy

1. Tabela 2.1 przedstawia skład chemiczny stopu AlZn5.5MgCu . Podano w niej wszystkie pierwiastki stopowe jednak bez bazy, czyli aluminium. Czy nie warto to uzupełnić? Łatwiej się to wtedy interpretuje (nie musimy sumować udziału pierwiastków stopowych, aby wiedzieć jaki jest udział Al).
2. Rys.2.8 – Mało precyzyjny opis rysunku. W rzeczywistości widzimy zaleganie wiórów w strefie skrawania, a nie sposób ich odprowadzania.
3. Str. 21, dolny akapit. Autor podaje, że „Jedynie liczba ostrzy $z < 5$ zapewnia uzyskanie wyników zadawalających pod względem jakości”. Jak to rozumieć? Czy w tym przypadku nie ma też znaczenia średnica freza? Warto to sprecyzować.
4. Str. 33 – drugi akapit od góry – należy dodać po F_c słowo „skorzystano” lub „zastosowano”.
5. W zakresie pracy na str.41 Autor precyzuje planowane badania doświadczalne. Podaje między innymi, że będą wykonywane pomiary amplitudy przyspieszenia drgań, jednak nie podaje, czy dotyczyć to będzie narzędzia czy przedmiotu obrabianego. Jest to ważna informacja i warto to doprecyzować.
6. Czy zamieszczone na rys.4.3 wykresy momentu i mocy elektrowrzeciona obrabiarki 100 DMU MonoBlock wyznaczał Autor sam, czy skorzystał z dokumentacji (DTR) maszyny?
7. Co prezentują kolory na rysunkach wyników symulacji MES płyt platformy pomiarowej wykonanych w dwóch wersjach (rys.4.5 c i d)? Czy odnoszą się do naprężeń, odkształceń i jakie przyjmują wartości przy danym obciążeniu?
8. Analizując zmianę częstotliwości wymuszającej f_E w funkcji prędkości wrzeciona Doktorant zastosował w opisie „wariant 1 i 2”. Czego one dotyczą? Czy odnosi się to do modeli płyty platformy pomiarowej?
9. W rozdziale 4.4.1 Doktorant analizował zmiany składowych siły skrawania oraz zmiany amplitudy przyspieszenia drgań. W tym drugim przypadku podano (rys.4.19), że otrzymane wartości dotyczą RMS, czyli wartości średniej kwadratowej. Nie ma jednak informacji, czy jest to RMS z zapisu pojedynczego sygnału, czy RMS z wszystkich prób, których ilość wynika z planu eksperymentu. Proszę o komentarz, w jaki sposób statystycznie opracowywano te wyniki badań. Można to też rozwinąć na składowe siły skrawania, bo też takich danych brakuje. Adekwatnie do tej uwagi warto byłoby jednoznacznie podać zakresy błędów

wyników pomiarów. Ma to istotne znaczenie przy interpretacji przedstawionych na wykresach danych.

10. Podobna techniczka uwaga do rys.4.20 i 4.21. Graficzny układ słupków danych na rys.4.20 został tak przyjęty, że w pionie znajdują się wartości od ujemnych do dodatnich. Na rys.4.21, przedstawiającym porównywalne wyniki, wartości przedstawiono w układzie odwrotnym. To w pierwszym momencie utrudnia szybką ocenę tych danych. Dodatkowo brakuje na rys.4.21 paska legendy odnośnie oznaczenia wartości kolorów.
11. Drgania w układzie OUPN są dużym problemem technologicznym i w większości przypadków są zjawiskiem nieoczekiwanym. Przeprowadzona przez Doktoranta, w rozdz. 4.4.2 od str.80, analiza FFT drgań była próbą interpretacji wpływu zmian geometrii ostrza na ich konstytuowanie. Przedstawiona w drugim akapicie na str.83 interpretacja tych wyników jest nie do końca przekonująca. Dyskusyjnym jest stwierdzenie o wpływie pozornie zwiększonej ilości ostrzy skrawających. Na podstawie jedynie zaprezentowanych wyników trudno byłoby tak wnioskować. A jak wytłumaczyć tak intensywny wzrost amplitudy dla freza z zarysem falistym zmiennym? Czy Autor próbował połączyć te informacje z jakością otrzymywanej po takiej obróbce powierzchni?
12. Kompleksową ocenę postaci wióra przeprowadzono w rozdz.4.4.3. Ich analiza była wyczerpująca i poprawna. Brakuje, wg recenzenta, w podsumowaniu tego rozdziału jedynie zwartej informacji na temat akceptowalnych kształtów wióra. Doktorant ocenia wióry, opisuje ich kształt, postać, wymiary, jednak nie podaje, które w jego opinii są w procesie skrawania do zaakceptowania w ujęciu technologicznym. Warto to uzupełnić, bo jest to interesująca informacja praktyczna.
13. Analizę jakości powierzchni po obróbce HPC zawarł Doktorant w rozdziale 4.4.4. W pierwszym akapicie tego rozdziału próbował wytłumaczyć potrzebę wykonania takich badań. Zauważył, że po obróbce HPC w wielu przypadkach przedmiot nadal będzie jeszcze kształtowany, a więc jakość powierzchni nie powinna być w tych warunkach znaczącym parametrem. Pominęto jednak istotny fakt wpływu operacji poprzedzających na finalną jakość powierzchni. Związane jest to z zjawiskiem tzw. pamięci technologicznej. Ten i inne argumenty przemawiają za koniecznością oceny jakości powierzchni, którą Doktorant wykonał w oparciu o pomiary SGP.
14. Doktorant w swojej dysertacji ocenia topografię powierzchni zmierzonych „mikroskopem światła białego”, a właściwie metodą *Focus Variation*. Wybrane widoki SGP zostały przedstawione na rys.4.31-4.35. Drobnymi uwagami technicznymi są brak w niektórych przypadkach skali na osi Z i również brak legendy odnośnie opisu barw prezentowanych struktur. W opisach tych struktur (str.91) Doktorant wielokrotnie stwierdzał pewne ich ukierunkowania losowe o konkretnie zdefiniowanych kierunkach. Są to ciekawe i ważne obserwacje, jednak brakuje parametrów to potwierdzających. Z naukowego punktu widzenia jedynie takie dane są wiarygodne, bo możliwe do zweryfikowania przez innych naukowców. Warto podkreślić, że w metrologii powierzchni dysponujemy parametrami pozwalającymi określić główne kierunki izotropii czy anizotropii powierzchni.

15. Interesująca ocena jakości powierzchni została wykonana w oparciu o parametry S_a i S_z . Ich wybór jest do zaakceptowania. Dyskusyjnym jest wykonanie i porównywanie danych typu S_a i S_z na jednym wykresie (rys.4.36) ze względu na zasadniczo inne zakresy ich wartości liczbowych. Istotne pytanie odnosi się do rys.4.37. W jaki sposób Autor chciał oceniać falistość powierzchni w oparciu o parametry S_a i S_z ? Te parametry są wyznaczone programowo z powierzchni, dla której powinno się odfiltrować wpływ falistości. Oczywiście są inne parametry oceniające falistość (np. W_z) jednak to nie jest S_a ani S_z .
16. Doktorant przeprowadził interesujące badania wpływu kąta pochylenia krawędzi skrawającej na wartości składowych siły skrawania. Ich dogłębne analizy przeprowadzono w rozdz.4.4.5. W ramach tych analiz Autor wykazał możliwość takiego ustalenia kąta pochylenia, dla którego $F_p = F_o$. Jaki jest jednak tego powód? Jak taki układ składowych siły oddziałuje na materiał lub narzędzie? Czy są to szczególne warunki wartę uwypuklenia?
17. Dla użytkownika przemysłowego interesujące mogą być modele składowych siły skrawania przedstawione w Tabeli 4.28. Czy Doktorant zastanawiał się jednak nad ich uproszczeniem? Czy takie „zaokrąglenie” wpłynie w istotny sposób na dokładność szacownych wartości?
18. Obszerne i interesujące badania wpływu sposobu chłodzenia przedstawił Autor w rozdz.4.4.7. Oceniał aż 5 metod podawania chłodziwa do strefy skrawania, co niewątpliwie pozwala na próbę wytypowania najbardziej racjonalnej metody. Oceniając efekty tych badań można stwierdzić, że pewien wpływ jest zauważalny, ale głównie odnosi się to do oceny amplitudy drgań. Czy jednak Doktorant zastanawiał się nad porównaniem tych wyników do obróbki bez chłodzenia? W wielu zakładach inżynierowie zastanawiają się nad celowością wprowadzania MQCL czy w ogóle obróbki bez chłodziwa, a wtedy prezentowane badania dostarczyłyby racjonalnych argumentów za wprowadzeniem bądź odrzuceniem proponowanych metod.
19. Autor, w wyczerpujący sposób, przedstawił w rozdziale 5 podsumowanie i główne wnioski z pracy. Większość z nich jest trafianie i czytelnie sformułowanych. Zastanawiające są jedynie wnioski czy zalecenia podsumowujące (str.125). Dlaczego Doktorant proponuje, jako najlepiej spełniające założenia przyjęte w tezie pracy, stosowanie centralnego sposobu doprowadzenia chłodziwa, skoro w pracy nie porównano obróbki bez i z chłodzeniem? To pytanie koresponduje z uwagą numer 18.

4. Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest napisana bardzo starannie. Właściwie nie znalazłem w niej większych błędów edytorskich (parę literówek, brak nawiasu, niepoprawny numer rysunku 4.29 [chyba 4.18], zamiast słowo „siły” jest „siła”, błąd edycyjny we wzorze 4.5, itp.). 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 jest szczególna staranność w zakresie estetyki informacji graficznych. Doktorant próbował z dużym sukcesem przedstawić w formie przemyślanych, własnych grafik otrzymane informacje eksperymentalne, czego przykładem mogą być tabele 4.11, 4.12 itd. czy 4.29-4.35. 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 stopów aluminium, szczególnie w warunkach obróbki wysokowydajnej oraz wpływu makrogeometrii narzędzia na efekty obróbki skrawaniem. 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 badawczy został osiągnięty.

Wśród wielu badań dotyczących obróbki HPC stopów aluminium mgr inż. Marcin Płodzień potrafił znaleźć istotny, z punktu widzenia naukowego i użytecznego, problem badawczy, który związany był z modyfikacją budowy narzędzi skrawających zarówno w aspekcie makrogeometrii jak i sposobu podawania chłodziwa. Efektem pracy Doktoranta jest ciekawa dysertacja, która niewątpliwie przyczyniła się do rozwoju dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Niepodważalne zalety pracy to:

1. Prawidłowo zaplanowane i przeprowadzone obszerne, wielokierunkowe badania eksperymentalne.
2. Dokonanie oceny szerokiej gamy parametrów opisujących makrogeometrię zmodyfikowanych narzędzi jak i efekty procesu kształtowania wybranego stopu aluminium metodami obróbki HPC.
3. Użyteczny, oczekiwany przez przemysł maszynowy charakter wniosków wynikających z dysertacji.

6. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina PŁODZIENIA pt. „Wpływ zarysu i kąta pochylenia krawędzi skrawającej oraz sposobu chłodzenia na wysokowydajną obróbkę stopu AlZn5.5MgCu ” umożliwia sformułowanie wniosku o spełnieniu warunków określonych ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595) i dopuszczeniu jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej w ramach dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn.

