

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, 18.03.2017r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała GDULI pt.

*„Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni
złożonych frezem toroidalnym”*

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej z dnia 10 lutego 2017 roku (RM-530-1-02-2016).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Nowoczesny przemysł maszynowy, zwłaszcza lotniczy i energetyczny, coraz częściej wykorzystuje nowe strategie obróbki w celu poprawnego kształtowania skomplikowanych powierzchni krzywoliniowych, często opisywanych jako powierzchnie złożone. W wielu przypadkach takim złożonym powierzchniom stawia się bardzo wysokie wymagania odnośnie dokładności wymiarowo-kształtowej czy stanu warstwy wierzchniej. To powoduje, że obróbka tych powierzchni jest trudna i niejednoznaczna. Najczęściej do kształtowania w procesach ubytkowych tego typu powierzchni stosuje się frezarki CNC umożliwiające frezowanie symultaniczne różnymi technikami. Do projektowania procesów technologicznych dla potrzeb frezowania symultanicznego wykorzystuje się zaawansowane systemy CAM. Odpowiednie przygotowanie algorytmów doboru strategii ruchów narzędzia jest ciągle jeszcze trudnym zagadnieniem. Poprawne zamodelowanie interakcji narzędzia z przedmiotem obrabianym w skojarzeniu z ustalonymi parametrami technologicznymi i możliwościami obróbkowymi maszyny jest dużym wyzwaniem inżynierskim. Mimo spodziewanych trudności Pan mgr. inż. Michał Gdula podjął się tego wyzwania, a efektem jego pracy jest przedłożona do recenzji rozprawa doktorska ujmująca proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym.

Jak już wspomniano, Doktorant mgr inż. Michał Gdula w swojej rozprawie doktorskiej zajął się bardzo ciekawą i aktualną tematyką kształtowania frezem toroidalnym złożonych powierzchni w procesie symultanicznego pięcioosiowego frezowania. Materiałem obrabianym był stop niklu Inconel 718 zaliczany do grupy trudnoskrawalnych materiałów konstrukcyjnych. Interesująca i kompleksowa analiza geometryczna odmian konstrukcyjnych powierzchni złożonych pozwoliła wyselekcjonować grupę powierzchni reprezentatywnych, na bazie których utworzono demonstrator pióra łopatki wirnika turbiny. Przyjęty przez Doktoranta zakres parametrów geometrycznych tej łopatki pozwolił na przeprowadzenie pełnych badań doświadczalnych w oparciu o plan statyczny trójpoziomowy kompletny. Taki plan pozwolił na uzyskanie szeregu modeli matematycznych w postaci funkcji wielomianowej. Korzystając z tak utworzonych modeli Doktorant przeprowadził szereg analiz matematycznych i innych badań modelowych. W aspekcie założonej tematyki badawczej, gdzie już w temacie pracy zaznaczono chęć oceny procesu symultanicznego frezowania, ustalenie takiego planu i zaawansowane podejście numeryczne do procesu jest jak najbardziej poprawne.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania oddziaływań mechanicznych w strefie skrawania oraz konstytuowania warstwy wierzchniej mają istotne znaczenie w lepszym poznaniu procesów zachodzących podczas obróbki symultanicznej frezem toroidalnym tego typu materiału konstrukcyjnego dla wytypowanego ostrza węglkowego przy zdefiniowanym zakresie zmienności geometrii złożonej powierzchni kształtowej.

Doktorant, na podstawie zawartych w swojej pracy informacjach literaturowych, dotyczących zarówno aspektu klasyfikacji i oceny powierzchni krzywoliniowych, sposobów programowania frezowania pięcioosiowego jak i kinematyki narzędzia, sformułował i przedstawił główne założenia i cel pracy.

Uogólniając mgr inż. Michał Gdula w swoich badaniach skoncentrował się na określeniu wpływu kątowych parametrów orientacji osi freza oraz promieni tworzących krzywiznę powierzchni złożonej na dokładność kształtową i chropowatość powierzchni w procesie symultanicznego pięcioosiowego frezowania. Dodatkowo Doktorant sprecyzował interesujący użyteczny cel pracy, którym było opracowanie koncepcji sterowania orientacją osi freza w zależności od promienia krzywizny powierzchni złożonej w celu uzyskania wymaganych parametrów dokładności wymiarowo-kształtowej i chropowatości powierzchni.

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

- Symultaniczna obróbka powierzchni krzywoliniowych, głównie będących efektem profilowania wszelkiego typu nowoczesnych łopatek turbin, jest coraz częściej spotykanym sposobem kształtowania tego rodzaju elementów maszyn.
- Ustalone przez Doktoranta kryteria oceny efektów pięcioosiowej symultanicznej obróbki są, w odniesieniu do kształtowanego elementu maszyn, jak najbardziej adekwatne z oczekiwaniami przemysłowymi.
- Przemysł maszynowy, w szczególności przemysł lotniczy i energetyczny, dąży do zmaksymalizowania efektywności produkcji elementów o skomplikowanych powierzchniach

krzywoliniowych, a zaproponowany przez Doktoranta algorytm doboru optymalnego, z punktu widzenia jakości i dokładności, kąta prowadzenia freza w skojarzeniu z klasyczną strategią obróbki pięcioosiowej w środowisku CAM, jest interesującym rozwiązaniem o dużym innowacyjnym potencjale.

W tym kontekście uważam, że wybór tematu rozprawy dotyczącej oceny procesu symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym jest jak najbardziej trafny i uzasadniony.

2. Zawartość pracy

Rozprawa jest obszerna, zawiera 131 stron podstawowej dysertacji, 36 stron załącznika i składa się z 6 rozdziałów. Rozdziały są czytelnie, logicznie ułożone, a większość z nich zawiera szereg dobrze zdefiniowanych podrozdziałów.

Praca jest bogato ilustrowana, zawiera w swojej podstawowej części 147 rysunków oraz 27 tabel. Spis literatury jest bardzo obszerny i ujmuje 138 z reguły dobrze dobranych i cytowanych w pracy pozycji. Doktorant wykazał w literaturze rozprawy doktorskiej swój istotny dorobek naukowy podając aż 9 artykułów, których był współautorem i jeden artykuł samodzielny. Podkreślić należy, że są to artykuły w większości punktowane, publikowane w znaczących czasopismach polskich jak i prezentowane na konferencjach tematycznych.

Dysertacja rozpoczyna się 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 pierwszym rozdziale rozprawy Doktorant przedstawił studium literatury, które można uznać za analizę zagadnienia dzieląc ten obszar wiedzy na pięć głównych podrozdziałów. Przedstawione dane dotyczą aktualnego stanu wiedzy z wyraźnym ukierunkowaniem na informacje, które zostały wykorzystane w dysertacji podczas dalszej analizy danych symulacyjnych i eksperymentalnych.

Drugi 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.

Badania własne z podziałem na badania symulacyjne i doświadczalne zostały przedstawione odpowiednio w rozdziałach trzecim i czwartym. Doktorant jednoznacznie zdefiniował problem badawczy dla potrzeb symulacji numerycznej podając swoje założenia, ograniczenia jak i parametry testowe. Budując plan badań opierał się na programie Placketta-Brumana zarówno podczas symulacji powierzchni wypukło-wklęsłej jak i wklęsło-wypukłej. Rozdział czwarty poświęcony badaniom doświadczalnym, gdzie przedstawiono stanowiska badawcze i strategię prowadzenia obróbki symultanicznej, zostały wyczerpująco i adekwatnie do zakresu badań opisane. Należy nadmienić, że w ramach tego rozdziału Doktorant dokonał również oceny wyników badań doświadczalnych. Jest to

jeden z najbardziej obszernych podrozdziałów pracy. Wyniki badań przedstawiono w trzech grupach oceniając wpływ wyselekcjonowanych dwóch parametrów, tj. kąta pochylenia (prowadzenia) α i promień krzywizny w kierunku posuwu ρ_1 na wartość odpowiednio:

- składowych siły skrawania,
- odchyłki kształtu,
- topografii powierzchni i parametrów chropowatości.

Interesującym zamknięciem prac badawczych jest piąty rozdział, w którym Doktorant przedstawił ideę algorytmu do sterowania kątem prowadzenia osi freza toroidalnego.

Podsumowanie i wnioski Doktorant przedstawił w rozdziale szóstym. Oddzielnym rozdziałem jest spis literatury wykorzystanej w dysertacji. Praca zawiera również streszczenie w języku polskim oraz angielskim jak i załącznik z poszerzonymi informacjami na temat prowadzonej analizy statystycznej.

3. Uwagi szczegółowe dotyczące pracy

1. W dysertacji Autor podaje (str.32, rozdz.1.3.2), podpierając się literaturą, że „znajomość wartości składowych siły skrawania w procesie obróbki pozwala na określenie (...) tworzenia wióra, struktury geometrycznej powierzchni (...)”. Jak to rozumieć? Czy na pewno w oparciu o znajomość nawet przebiegu składowych siły skrawania, oceniając i uwzględniając dynamikę procesu, można prognozować proces tworzenia wióra (kształt, rodzaj, grubość?) lub konstytuowanie struktury geometrycznej powierzchni?
2. Na jakiej podstawie Doktorant przyjął, ustalone w tab.3.1, zakresy zmienności promieni krzywizn badanych powierzchni wypukło- wklęsłych i wklęsło-wypukłych oraz kąty prowadzenia i pochylenia osi freza toroidalnego? Wspomniano jedynie, że odbywało się to na podstawie analizy obszaru adekwatnego, jednak nie wspomniano, skąd pobrano informacje o tym obszarze.
3. Bardzo ważne, z punktu widzenia planowanego zakresu badań eksperymentalnych, było ustalenie istotności zaproponowanych parametrów geometryczno – technologicznych ($\alpha, \beta, \rho_1, \rho_2$). Doktorant przeprowadził to w rozdziale 3.3.1. Przyjęto poziom istotności wynoszący 0.05. Bazując na tabelach 3.6 oraz 3.9 można jednak stwierdzić, że dla powierzchni wypukło- wklęsłej istotność dla ρ_1, ρ_2 zawiera się w przedziale 0.044 – 0.046, a dopiero dla powierzchni wklęsło-wypukłej jest to przedział 0.039 – 0.049. W związku z tym, jaki był powód jednoznacznego odrzucania, dla obydwu powierzchni, oceny wpływu promienia ρ_2 , opisującego krzywiznę powierzchni w kierunku prostopadłym do posuwu? Czy nie byłoby uzasadnionym uwzględnić ten parametr dla powierzchni wypukło- wklęsłej?
4. Interesująca jest ocena chwilowego pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej w funkcji kąta chwilowego położenia ostrza freza przedstawiona na rys.3.15 oraz 3.17. Odpowiednie komplety wykresów odnosiły się do wytypowanych dwóch kształtów modelowych powierzchni. W obu przypadkach Doktorant wspomina, że „rozkład chwilowego przekroju warstwy skrawanej $A_z(\phi)$ ma podobny charakter zmian” (str.55 – górny akapit). W jaki parametryczny sposób zostało to „podobieństwo” ocenione? Interesującym byłoby

wykorzystać w tym przypadku np. wyznaczony kierunek przesunięcia A_{zmax} obliczając jego kąt pochylania lub ustalając zmiany gradientów poszczególnych krzywych.

5. Sposób realizacji badań doświadczalnych został szczegółowo i wyczerpująco opisany. Dobrym dopełnieniem tego opisu byłoby jednak zamieszczenie klasycznego rysunku technicznego przedstawiającego przedmiot badań tj. modelu łopatki – odnosi się to do rys. 4.2 i bezpośrednio do rys. 4.3.
6. Zapis składowych siły skrawania wykonywano na siłomierzu obrotowym. Doktorant podał, że w celu filtracji sygnału o znaczącej fluktuacji zastosowano tzw. średnią ruchomą. Podano również, że „odstęp okienkowania” to 50 - chyba impulsów. Skąd dobrano tę wartość? Jak się to ma do częstotliwości próbkowania? Ile ona wynosiła? Są to istotne informacje pozwalające ocenić między innymi dynamikę procesu i pośrednio sztywność układu pomiarowego.
7. Jaki jest błąd pomiaru wartości składowych siły skrawania? Znajomość tego błędu ma istotne znaczenie przy ocenie jakości modeli numerycznych definiowanych na tej podstawie (np. równania 4.2, 4.3, 4.6, 4.7). Szczególnie jest to też ważne ze względu na fakt, że Doktorant przy ocenie poszczególnych wpływów promieni, kątów prowadzenia itd. korzystał z wykresów budowanych na podstawie tych modeli.
8. Prezentując wyniki swoich badań w formie graficznej Doktorant przedstawiał wykresy, gdzie na osi odciętych (oś X) zamieszczał punkty, które nie były uwzględniane w planie badań. Przykładowo dla ρ_1 podano 30, 92, 153, 215, 277, 338 i 400 (7 punktów), a w planie jest jedynie 30, 215 i 400 (3 punkty). Jak to rozumieć? Czy to jest jedynie pewne graficzne rozwiązanie prezentacji tych krzywych?
9. Bardzo interesujące są modele opisujące wpływ promienia krzywizny ρ_1 na parametry chropowatości, szczególnie przy obróbce powierzchni wklęsłej. Analizując te przebiegi można zaobserwować, że dla ρ_1 równego około 50 i 90 mm występują nieznaczne przegięcia krzywych (rys. 4.49, 4.55, 4.58). Z czego te lokalne zmiany, lokalne minima, mogą wynikać? Czy ta informacja może być wykorzystana do optymalizacji procesu?
10. Trudno jednoznacznie analizować efekty asymetrii (skośności) i nachylenia (stromości) profilu na bazie oddzielnie przedstawionych parametrów R_{sk} i R_{ku} . Dużo łatwiej taką analizę przeprowadzić budując wykresy, gdzie R_{sk} podawane jest na osi odciętych, a R_{ku} na osi rzędnych.
11. Autor, w wyczerpujący sposób, przedstawił w rozdziale 6 podsumowanie i główne wnioski pracy. Dokonując ich analizy można jednak zauważyć, że wnioski te dotyczą zarówno fazy badań eksperymentalnych, do których zaliczymy wnioski o charakterze poznawczym jak i pewnych informacji bardziej utylitarnych. Czy nie można by wydzielić pewne wnioski utylitarne tak, aby podkreślić możliwość implementacji tej wiedzy do zastosowań praktycznych w pięcioosiowej obróbce tego typu elementów maszyn?

4. Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest napisana bardzo starannie. Właściwie nie znalazłem w niej większych błędów edytorskich. 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.). Należy podkreślić, że rysunki wykonano szczególnie starannie. Doktorant próbował z dużym sukcesem przedstawić w formie przemyślanych, własnych grafik pewne zagadnienia techniczne czy informacje literaturowe ważne dla treści pracy, czego przykładem mogą być rysunki 1.5, 1.13, 3.12. Odnosi się to również do zamieszczonych tabel czy schematów blokowych. 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 symultanicznej powierzchni krzywoliniowych, a dodatkowo wykazał się wiedzą z obszaru programowania obrabiarek CNC i pisania programów komputerowych w oparciu o język programowania Visual Basic. 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 symultanicznej powierzchni krzywoliniowych mgr inż. Michał Gdula potrafił znaleźć istotny, z punktu widzenia naukowego i użytecznego, problem badawczy, który związany był z oceną procesu symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym. Efektem pracy Doktoranta jest ciekawa dysertacja, w której zawarte informacje niewątpliwie przyczyniły się do rozwoju dyscypliny definiowanej jako Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Niepodważalne zalety pracy to:

1. Prawidłowo zaplanowane i przeprowadzone obszerne, wielokierunkowe badania eksperymentalne.
2. Wykorzystanie kompleksowych badań symulacyjnych do przygotowania adekwatnego i racjonalnego planu badań eksperymentalnych.
3. Dokonanie oceny szerokiej gamy parametrów opisujących efekty procesu kształtowania powierzchni krzywoliniowych w celu ustalenia możliwych do wyznaczenia pomiędzy nimi interakcji i zbudowania koniecznych modeli numerycznych.

4. Opracowanie koncepcji adaptacyjnej metody obróbki pięcioosiowej wraz z jej wdrożeniem i pozytywną weryfikacją.
5. Utylitarny, oczekiwany przez przemysł maszynowy charakter wniosków wynikających z dysertacji.

6. Wniosek końcowy

Całość oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Michała GDULI pt. „Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym” 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.

