

Poznań, dnia 17 marzec 2017r.

Dr hab. inż. Paweł Twardowski
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
pl. Mari Skłodowskiej-Curie 5
60-965 Poznań

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Michała Gduli

pt.

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

Podstawa opracowania

- praca doktorska mgr inż. Michała Gduli, której promotorem jest dr hab. inż. Jan Burek, prof. Politechniki Rzeszowskiej,
- pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa, z dnia 10 lutego 2017 roku w sprawie opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Michała Gduli.

Ogólny opis pracy

Opiniowana praca doktorska pięcioosiowego frezowania frezem toroidalnym powierzchni złożonych. Problematyka jest istotna i aktualna z praktycznego punktu widzenia, bowiem dotyczy poprawy jakości gotowych wyrobów po frezowaniu dokładnym.

Tematyka podjęta w pracy przez Autora jest aktualnie badana i rozwijana przez ośrodki naukowo-badawcze na całym świecie. Ponadto, praca jest trudna technologicznie, i co najważniejsze, praktyczna.

Praca liczy 170 stron. Składa się z wprowadzenia poprzedzonego spisem treści, streszczeniem i wykazem ważniejszych oznaczeń, oraz pięciu rozdziałów zasadniczych (rozdz. 1–5), podsumowania i wniosków (rozdz. 6), wykazu literatury i czterech załączników. Wykaz literatury obejmuje 138 pozycje w tym 1 pozycja autorska i 9 współautorskie.

Pan mgr inż. Michał GDULA wykonał pracę doktorską pod kierunkiem dr hab. inż. Jana BURKA, prof. Politechniki Rzeszowskiej w Katedrze Technik Wytwarzania i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej.

Uważam, że przedstawiona do opiniowania praca stanowi opracowanie w zakresie określonym tematem podjętym przez Autora.

Ocena merytoryczna

Autor w pracy podjął się zadania szczegółowej analizy procesu pięcioosiowego frezowania frezem toroidalnym, oraz zaproponował praktyczne rozwiązanie polegające na sterowaniu w trakcie frezowania kątem prowadzenia osi freza.

W krótkim wprowadzeniu Autor przedstawił na czym polega problem którym się zajął i krótko scharakteryzował kolejne rozdziały. Podkreślił też, że od powierzchni złożonych i krzywoliniowych wymagane są odpowiednie dokładności kształtu jak też stanu warstwy wierzchniej. Ponadto zasygnalizował, że do modelowania powierzchni złożonych stosowane są zaawansowane systemy CAD/CAM, które później wykorzystał w swojej pracy.

W rozdziale 1 (Obróbka powierzchni złożonych) Autor na podstawie literatury opisał szczegółowo, na czym polega problem którym się zajął. Na początku rozdziału dokonał klasyfikacji powierzchni na: powierzchnie o stałej tworzącej i powierzchnie o zmiennej tworzącej, podając dalej podgrupy. Następnie podaje przykłady form geometrycznych opisane powierzchniami krzywoliniowymi. Podział ten jest syntezą danych literaturowych i stanowi oryginalne opracowanie autorskie. Cytowana literatura jest dobrana właściwie tzn. dominują czasopisma z ostatnich lat i ściśle związane z tematem pracy. Na osobny komentarz zasługuje sposób cytowania, rzadko spotykany w literaturze polskiej i angielskojęzycznej. Zamiast podawać kolejny numer publikacji Autor stosuje rozwiązanie dość nietypowe polegające na podawaniu pierwszych trzech liter nazwiska, następnie dwie cyfry oznaczające rok wydania. Nie jest to co prawda nieczytelne, ale chcąc dowiedzieć się ile jest wszystkich cytowanych publikacji trzeba je po prostu policzyć. Bardzo mocną stroną tego rozdziału jest (oprócz aspektów merytorycznych) wyjątkowo staranna i czytelna szata graficzna, która zasługuje na najwyższe oceny.

W rozdziale 2 (Cel, hipoteza i zakres pracy), na podstawie przeprowadzonej analizy, Autor sformułował cel pracy. Cel został sformułowany prawidłowo i nie budzi żadnych wątpliwości. Następnie Autor podaje cel utylitarny, który jest konsekwencją wcześniejszych osiągnięć. Dalej sformułowana jest hipoteza pracy i podobnie jak cel jest prawidłowa i zrozumiała. Następnie Autor podaje szczegółowo zakres pracy i etapy badań. Na końcu rozdziału w postaci graficznej szczegółowo wyjaśniony jest plan badań symulacyjnych i plan badań doświadczalnych.

W rozdziale 3 (Badania symulacyjne) przeprowadzono szczegółową analizę frezowania pięcioosiowego frezem toroidalnym. Warunki badań symulacyjnych zakładały szczegółowe przebadanie kąta pochylenia osi narzędzia w kierunku posuwu (kąt prowadzenia) w zakresie $3^{\circ} < \alpha < 23^{\circ}$, oraz kąta pochylenia osi freza w kierunku prostopadłym do posuwu w zakresie $0^{\circ} < \beta < 15^{\circ}$. W tym celu skorzystano ze statystycznego programu planowania badań ustalając plan badań dla symulacji obróbki powierzchni wypukło-wklęsłej i symulacji obróbki powierzchni wklęsło-wypukłej. Wszystkie symulacje przeprowadzono w środowisku CAD/CAM. Wynikiem symulacji było stwierdzenie, że na przekrój warstwy skrawanej w obróbce powierzchni wypukło-wklęsłej jak i wklęsło-wypukłej istotnie wpływa tylko kąt prowadzenia α oraz promień krzywizny w kierunku posuwu narzędzia ρ_1 . Ponadto wykazano, że wielkości te mają istotne znaczenie i wpływ na składowe siły skrawania, odchyłkę kształtu i parametry chropowatości powierzchni obrobionej.

Rozdział 4 (Badania doświadczalne) dotyczy przeprowadzenia prób frezowania pięcioosiowego na obiekcie rzeczywistym. Przedmiotem badań była wypukła oraz wklęsła powierzchnia pióra łopatki wirnika turbiny. Warunki badań (co do zmienności parametrów kąta prowadzenia α oraz promień krzywizny w kierunku posuwu narzędzia ρ_1) były takie same jak w badaniach symulacyjnych. Ocenie poddane były składowe siły całkowitej, odchyłka kształtu oraz parametry chropowatości 2D i 3D powierzchni obrobionej. Badania przeprowadzono na pięcioosiowym centrum frezarskim 100 DMU MonoBlock. Autor jednak nie definiuje precyzyjnie pojęcia odchyłka kształtu. Co prawda takie definicje podaje norma, jednak w badaniach naukowych niekiedy pewne pojęcia czy definicje są modyfikowane na potrzeby badań i nie koniecznie muszą odpowiadać normie. W badaniach przyjęto kryteria dotyczące odchyłka kształtu i parametrów chropowatości oraz określono minimalną wartość kąta α_{min} . W sposób jasny i czytelny opisano też tor pomiarowy składowych siły całkowitej. W opisie wyników Autor nie ustrzegł się jednak błędów. Na stronie 68 podaje w jaki sposób przeprowadził filtrację sygnałów składowych sił. Z przedstawionego opisu wynika, że Autor nie do końca rozumie lub źle interpretuje pojęcie związane z filtracją sygnałów. Stosowanie standardowych funkcji programu EXCEL typu MODUŁ.LICZBY czy ŚREDNIA.RUCHOMA nie ma nic wspólnego z filtracją sygnałów pomiarowych. Skoro mowa o filtracji to może być filtracja górno lub dolnoprzepustowa, pasmowo przepustowa lub pasmowo zaporowa z konkretnymi nastawami filtrów wyrażanych w hercach. Natomiast metodyka pomiaru odchyłka kształtu i chropowatości powierzchni obrobionej nie budzą żadnych zastrzeżeń. W wielu miejscach opisu Autor stosuje zwrot użyte np. „narzędzie użyte do badań”. Zdecydowanie lepiej stosować słowo zastosowane. Efektem końcowym badań są funkcje matematyczne typu wielomian drugiego stopnia opisujące badane wielkości (siły, błąd kształtu i parametry chropowatości) w funkcji kąta α i promienia ρ_1 . Cały rozdział obfituje w bardzo czytelne i starannie wykonane rysunki i wykresy sprawiające dużą przejrzystość pracy. Można znaleźć też drobne błędy, jak na stronie 94 rysunek 4.51, gdzie Autor pomylił opis osi pionowej, jednak nie ma to żadnego wpływu na merytoryczną ocenę rozdziału.

W następnym 5 rozdziale Autor przedstawił koncepcję sterowania kątem prowadzenia osi frezu toroidalnego α i promienia krzywizny ρ_1 w czasie rzeczywistym. Na rysunku 5.1 przedstawiono algorytm doboru kąta α z uwzględnieniem kryterium jakim jest błąd kształtu Δ_k , oraz ograniczenia w postaci parametry chropowatości Ra i wartości α_{min} . Następnie Autor wyjaśnia na czym polega koncepcja adaptacyjna metody obróbki pięcioosiowej podając wszystkie szczegóły z tym związane. Rozdział kończy się wykresami ilustrującymi otrzymane wyniki badań, które potwierdzają poprawność przyjętej metody kompensacji, pokazując jednocześnie korzyści ze stosowania tej metody. Pewne wątpliwości budzi jednak zastosowanie parametru chropowatości Ra . Zgodnie z definicją jest to *średnie arytmetyczne odchylenie zarysu od linii średniej* (linia średnia - wyznaczona metodą najmniejszych kwadratów). Jak sama nazwa wskazuje jest to wartość średnia i bardzo często nie jest wielkością reprezentatywną do mikronierówności tworzących daną warstwę. Wg metrologów bazowanie na tej wartości (choć w pewnych przypadkach daje poprawne wyniki) jest niepewne a sam parametr Ra nie oddaje charakteru mikronierówności powierzchni obrobionej. Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie parametru Rz i na jego podstawie sterować procesem. To, że wyniki badań wyszły pozytywnie to jeszcze nie dowód na przydatność parametru Ra .

Podsumowanie i wnioski przedstawione w *rozdziale 6* potwierdzają osiągnięcie założonego celu i nie budzą zastrzeżeń pod względem merytorycznym i formalnym. Zastrzeżenia można z kolei mieć do szczegółowości wniosków, które zostały sformułowane na 3 stronach. Wydaje się, że forma wniosków w postaci wypunktowanych krótkich akapitów byłaby bardziej czytelna.

Ocena redakcyjna

Praca doktorska mgr inż. Michała GDULI stanowi kompletne opracowanie naukowe zgodne z tematem określonym w tytule, logiczne pod względem struktury, podziału treści, kompletności celów i wniosków końcowych.

Autor stosuje w pracy poprawną terminologię oraz jednostki układu SI.

Bardzo silną stroną pracy są bardzo starannie opracowane rysunki, ilustracje i schematy, co powoduje, że praca jest czytelna i zrozumiała. Z edytorskiego punktu widzenia przygotowana jest wzorowo. Analizując całość trudno było znaleźć błędy redakcyjne lub stylistyczne. Na specjalny komentarz zasługuje fakt, że w całej pracy nie znaleziono tzw. literówki np. zamiast *q* jest *a* itp. Brak tego typu drobnych błędów wydaje się mało prawdopodobny.

Kolejna uwaga dotyczy poprawności języka polskiego, a konkretnie chodzi o następujący przykład: powinno być *średnica freza* czy *średnica frezu*? Od kilku lat coraz więcej polskich ośrodków stosuje zwrot *średnica frezu*, który podobno został uznany przez polonistów za formę poprawną. Jednak jak widać na przykładzie niniejszej rozprawy, w której Autor stosuje zwrot *freza*, nadal jest to sprawą dyskusyjną.

Uwaga końcowa dotyczy wykazu literatury gdzie w wielu miejscach brakuje numeracji stron cytowanych publikacji z czasopism światowych i niekiedy Autor zapomina o podaniu nazwy wydawnictwa.

Wartość naukowa i przydatność praktyczna pracy

Problemem naukowym rozwiązany w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Michała GDULI było symultaniczne pięcioosiowe frezowanie frezem toroidalnym powierzchni złożonych. W tak określonym obszarze zagadnienie zostało przez Autora rozwiązane w sposób bardzo dobry.

Podjęta tematyka w pracy jest trafna i ma duże znaczenie praktyczne. Wybór tematyki pracy w aspekcie praktycznej przydatności osiągniętych rezultatów, jest słuszny.

Problematyka którą zajął się Autor jest rozwijana przez różne ośrodki naukowo-badawcze i dotyczy nie tylko frezów torusowych ale także kulistych. W obydwu przypadkach nadrzędny cel jest ten sam – zachować w miarę możliwości stałe warunki skrawania. Okazuje się, że w przypadku frezowania powierzchni złożonych nie jest to łatwe. Zaproponowanie więc sprawdzonego rozwiązania praktycznego stanowi pewien przełom w tym zakresie, tym bardziej, że od kilku firmy zajmujące się systemami CAD/CAM próbują takie rozwiązania zastosować w warunkach przemysłowych, jak na razie bezskutecznie. Pod tym względem zaprezentowana rozprawa doktorska zasługuje na najwyższą ocenę.

Dalsze rozwijanie prac w podjętym przez Autora kierunku, już w krótkim czasie powinno zaowocować konkretnymi aplikacjami przemysłowymi.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do opiniowania praca doktorska mgr inż. Michała GDULI wykazała, że Autor ma właściwe rozeznanie naukowej problematyki w zakresie objętym dysertacją, tj. znajomość aktualnej wiedzy teoretycznej i praktycznej oraz metod badawczych.

Kandydat rozwiązał problem naukowy polegający na opracowaniu i przebadaniu nowej strategii obróbki powierzchni złożonych uzyskując doskonałe rezultaty.

Na tej podstawie stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Michała GDULI pt. „Proces symultanicznego pięcioosiowego frezowania powierzchni złożonych frezem toroidalnym” spełnia wymagania zawarte w ustawie z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym ... i może być dopuszczona do publicznej obrony.



dr hab. inż. Paweł TWARDOWSKI

