

Dr hab. inż. Piotr Boral, prof. PCz
Katedra Technologii i Automatykacji
Wydz. Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

Częstochowa, dn.23.10.2023r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Basary nt.:

„Minimalizacja wpływu temperatury na powtarzalność charakterystyk końcowych części obrabianych na centrach numerycznych z wykorzystaniem kompensacji w czasie rzeczywistym”

wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Leszka Skoczylasa, prof. PRz

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera 173 stron i składa się z 8 zasadniczych rozdziałów oraz wprowadzenia, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń i akronimów, podsumowania, bibliografii obejmującej 143 pozycji, złączników oraz streszczeń w języku polskim i angielskim.

W rozdziale zatytułowanym „Wprowadzenie” Autor przedstawił wstęp do tematyki rozprawy. Charakteryzuje w nim wpływ zjawisk fizycznych związanych z wydzielaniem ciepła, towarzyszących obróbce skrawania, na utrzymanie określonej dokładności obróbki i powtarzalność wymiarową. Zwraca uwagę na problemy uzyskania wymaganej dokładności wytwarzanych elementów lotniczych. Przedstawia możliwość ich rozwiązania, poprzez zmniejszenie błędów, spowodowanych wpływami termicznymi w trakcie realizacji procesów obróbczych, a następnie wskazuje przedmiot zrealizowanych badań.

W pierwszych trzech rozdziałach Autor dokonał przeglądu literatury, przedstawiając aktualny stan zagadnienia w oparciu o wyniki prac różnych badaczy. W pierwszym rozdziale scharakteryzował najważniejsze czynniki wpływające na dokładność i powtarzalność obróbki oraz sklasyfikował błędy w obrabiarkach, oddziałujące na błędy obróbki. Zwrócił szczególną uwagę na błędy termiczne, które

są wynikiem złożonego oddziaływania temperatury na różne komponenty maszyny oraz materiały, z których są wykonane.

W rozdziale drugim Autor przedstawił stosowane techniki pomiaru temperatury, pozwalające określić rozkład temperatur na poszczególnych elementach składowych obrabiarki, przestrzeni roboczej oraz na przedmiocie obrabianym. Opisał sposoby i możliwości pomiaru temperatury z wykorzystaniem metod termowizyjnych i stykowych. Według zaprezentowanych opracowań większość błędów geometrycznych obróbki na obrabiarkach jest spowodowanych niekorzystnym wpływem zjawisk termicznych. Zmiany temperatury podzespołów obrabiarki oraz całego zespołu OUPN (obrabiarka, uchwyt, przedmiot obrabiany, narzędzie) powodują odkształcenia, wynikające z rozszerzalności cieplnej, co prowadzi do przemieszczeń względnych przedmiotu obrabianego reprezentowanego przez WSK (układ współrzędnych przedmiotu obrabianego) oraz narzędzia reprezentowanego przez TCP (centralny punkt narzędzia). Z punktu widzenia dokładności obróbki generowane są odchylenia trajektorii ruchu TCP względem części obrabianej oraz błędy spowodowane rozszerzalnością materiału obrabianego. Autor przedstawił możliwości pomiaru odkształceń termicznych na obrabiarkach CNC poprzez pomiar dryftu termicznego punktu centralnego narzędzia obróbczego (TCP) oraz pomiar odkształceń termicznych poszczególnych podzespołów obrabiarki. Zaprezentował przykłady testów pomiarów błędów termicznych z wykorzystaniem trzpienia wzorcowego, zainstalowanego we wrzecionie głównym, bezdotykowych przetworników przemieszczeń, interferometru laserowego, „ballbar-a” oraz podstawowych urządzeń pomiarowych znajdujących się na wyposażeniu współczesnych obrabiarek CNC.

Następnie Autor opisał metody bezpośrednie i pośrednie kompensacji błędów termicznych, polegające na wprowadzeniu do układu sterowania obrabiarki wartości korygującej błąd wywołany zjawiskami termicznymi. Producenci współczesnych systemów sterowania obrabiarek umożliwiają takie rozwiązanie za pośrednictwem odpowiednich zmiennych, do których można wprowadzić kompensacje na podstawie ustalonego modelu opisującego błąd termiczny. Modele opisujące ten błąd są funkcją wielu zmiennych w oparciu o pomiary wybranych parametrów. Mogą to być modele liniowej oraz nieliniowej regresji, modele dynamiczne, sztucznych sieci neuronowych i innych. Ważny jest odpowiedni wybór punktów pomiarowych temperatury w celu uzyskania najlepszego dopasowania modelu do rzeczywistych zmian.

W rozdziale czwartym zdefiniowano cele pracy oraz wymieniono szczegółowo zagadnienia obejmujące zakres rozprawy doktorskiej.

W rozdziale piątym Autor opisał założenia dotyczące przedmiotu badań oraz stanowisko badawcze. Jako stanowisko badawcze wykorzystał centrum obróbcze mCm

iTank 1600 wyposażone w sterowanie Sinumerik 840D SL, na którym została wdrożona autorska aplikacja do kompensacji przemieszczeń TCP względem punktu bazowego części obrabianej. Autor przedstawił charakterystykę ogólną stanowiska, użytego oprzyrządowania do pomiaru dryftu termicznego TCP oraz geometrii obrabiarki i pomiaru temperatury.

W rozdziale „*Badania kontrolne obrabiarki*” Autor na wstępie dokonał analizy odkształceń kolumny wzorcowej poprzez przeprowadzenie symulacji MES z wykorzystaniem modułu Mechanical w oprogramowaniu Ansys Workbench 18.2. Analizy przemieszczeń termicznych wykonane były względem prostokątnego układu współrzędnych umieszczonego w punkcie referencyjnym palety, który jest jednocześnie punktem zera maszynowego dla osi X, Y, Z obrabiarki. Na podstawie uzyskanych danych symulacyjnych opracowano model przemieszczeń temperaturowych dla założonych punktów referencyjnych. W celu oceny niepewności pomiarów pozycji TCP sondą przedmiotową RMP600 na badanej obrabiarce przeprowadzono eksperymenty cyklicznych pomiarów środka otworu, kuli oraz płaszczyzny znajdujących się na kolumnie wzorcowej. Opierając się o wytyczne normy ISO230-2, wykonano badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi obrabiarki z wykorzystaniem interferometru laserowego. Przeprowadzono również badania geometryczne obrabiarki zgodnie z wytycznymi normy ISO10791-1 oraz ISO 10791-3. W ramach testów geometrycznych zmierzono błędy ruchu osi linowych w zakresie błędów prostoliniowości, prostopadłości oraz odchyłki rotacji.

Autor opracował procedurę pomiarową, której zadaniem jest kontrola wybranych parametrów geometrycznych oraz ustawczych obrabiarki, z wykorzystaniem kolumny wzorcowej ustalonej na paletce. Na podstawie wyników programu pomiarowego jest możliwość skompensowania parametrów ustawczych obrabiarki, dotyczących położenia zera maszynowego oraz wyliczenia i skompensowania położenia rzeczywistego osi obrotu względem zera maszynowego. W ramach badań zmian temperatury podzespołów obrabiarek Autor wykorzystał dodatkową funkcjonalność systemu sterowania w postaci wysyłania danych temperaturowych do sterownika CNC, aby dane te dostępne były do wykorzystania do realizacji algorytmów kompensacji temperaturowej. Na podstawie uzyskanych danych opracowano dane statystyczne temperatur elementów obrabiarki, które posłużyły do określenia współczynników tłumienia α wskazań czujników temperatury. Wyznaczone współczynniki α posłużyły do wygładzenia przebiegu zmian temperatury w stosunku do oryginalnych danych i odpowiedniego zapisu matematycznego umożliwiającego wprowadzenie obliczeń.

W rozdziale siódmym Autor przedstawił opracowany model matematyczny przemieszczeń TCP w zależności od zmiany temperatury podzespołów obrabiarki i płynów eksploatacyjnych. Opisał narzędzia statystyczne, na podstawie których opracował model regresji liniowej dla zmiennej objaśniającej y i x . Po merytorycznym uzasadnieniu ostatecznie Autor uznał, że tylko model regresji dla zmiennej objaśniającej y należy zaimplementować w systemie sterowania obrabiarki.

W kolejnym rozdziale Autor na podstawie przedstawionego modelu zaimplementował kompensację do systemu sterowania obrabiarki. Do realizacji algorytmów i obliczeń w czasie rzeczywistym wykorzystano akcje synchroniczne układu sterowania Sinumerik. Dokonano weryfikacji rozwiązania programowego z wykorzystaniem symulatora Sinutrain (wirtualnego bliźniaka sterowania CNC), a następnie przeprowadzono praktyczną weryfikację proponowanego rozwiązania na obrabiarce CNC. Przedstawiono realizację dwóch eksperymentów obróbki płyty z regularnie rozmieszczonymi otworami zgodnie z płaszczyzną XY układu WSK z uruchomioną kompensacją Autora i bez. Weryfikacji wymiarów obrobionych płyt dokonano na maszynie współrzędnościowej Altera-M20.12.10. Na podstawie wyników pomiarów porównano wskaźniki jakościowe obu eksperymentów. Zaobserwowano poprawę miary wskaźników jakościowych na korzyść otworów wykonanych z uruchomioną kompensacją.

W podsumowaniu Autor na podstawie przeprowadzonych badań, które były realizowane w warunkach produkcyjnych, wskazał swoje najważniejsze osiągnięcia oraz zaproponował dalsze badania dotyczące wpływu temperatury na dokładność obróbki na badanej obrabiarce oraz próby zastosowania przedstawionego podejścia na innych obrabiarkach.

2. Ocena pracy

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy istotnych zagadnień kompensacji błędów obróbki na obrabiarce sterowanej numerycznie, wynikających ze zmian temperatury podzespołów obrabiarki, całego zespołu OUPN oraz płynów eksploatacyjnych. W celu rozwiązania tego złożonego zagadnienia Autor opracował model matematyczny, wprowadził implementację do systemu sterowania obrabiarki i przeprowadził badania weryfikujące. Istotą rozwiązania tego zagadnienia jest opracowanie sposobu redukcji błędów spowodowanych odkształceniami termicznymi obrabiarek CNC możliwego do zrealizowania w warunkach produkcyjnych i nie wymagającego głębokiej ingerencji w strukturę obrabiarki i jej system sterowania. Do badania zmian temperatury Autor wykorzystał układ stabilizacji temperatury, w który

wyposażona jest obrabiarka. Wprowadzono dodatkową funkcjonalność tego systemu w postaci wysyłania danych temperaturowych do sterownika CNC i możliwość wykorzystania ich w ramach realizacji algorytmów kompensacji temperaturowej. Implementacja kompensacji temperaturowej do systemu sterowania obrabiarki zrealizowana została poprzez szereg akcji synchronicznych, które służą do programowania reakcji układu sterowania na wydarzenia w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie ich przez Autora jest dobrym zastosowaniem.

Wybór tak określonej tematyki badawczej, jako przedmiotu rozprawy doktorskiej, w kontekście literatury cytowanej przez Autora oraz potrzeby wdrożenia w rzeczywisty proces obróbki, uważam za w pełni uzasadniony.

Wdrożona autorska procedura pomiarowa z wykorzystaniem kolumny wzorcowej pozwala na kontrolę wybranych parametrów geometrycznych oraz na kontrolę poprawności położenia punktu zera układu maszynowego dla analizowanej obrabiarki, co pozytywnie wpływa na wskaźniki produkcyjne.

Zakres przeprowadzonych badań oraz uzyskane wyniki scharakteryzowano w punkcie pierwszym niniejszej recenzji, gdzie wyszczególniono działania podjęte przez Autora w ramach realizowanego zakresu rozprawy oraz wyeksponowano najważniejsze osiągnięcia uzyskane w wyniku realizacji podjętych zadań, zarówno w aspekcie naukowym i badań eksperymentalnych.

Analizując zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że postawione i zrealizowane w niej zadania mają znaczenie zarówno poznawcze, ale przede wszystkim praktyczne dla przemysłowych zastosowań, a zamieszczone w pracy wyniki badań potwierdzają prawidłowość sformułowanych wniosków, co stanowi dobrą bazę do dalszych badań.

Oceniając formę pracy chciałbym stwierdzić, że jest ona napisana bardzo starannie i przejrzysto. Zawiera wiele ilustracji graficznych, w tym wykresów, które ułatwiają właściwą interpretację przedstawianych wyników. Można zauważyć także pewne usterki, z których najbardziej istotne lub przykładowe wyszczególniłem w formie uwag w dalszej części niniejszej recenzji.

Uwagi ogólne:

- praca ma charakter wdrożeniowy i przyczynia się do wymiernych efektów finansowych dla przedsiębiorcy np. poprzez skrócenie czasu procesu wytwarzania. Moim zdaniem ta kwestia powinna być bardziej uwypuklona w pracy.

- Autor wspomniał, że podczas procesu produkcji seryjnej przekładni AGB realizowanego w zakładzie produkcyjnym na obrabiarce wyposażonej w system stabilizacji termicznej trudno jest zapewnić wymaganą dokładność obróbki. Problem był częściowo rozwiązany poprzez częste ponawianie bazowania obrabiarki tzn. pomiar punktu odniesienia przedmiotu obrabianego w czasie procesu obróbki. Jak często pomiar był wykonywany i ile zajmował czasu?
- Autor założył, że zakres badań przemieszczeń TCP względem punktu bazowego przedmiotu obrabianego obejmuje jeden wybrany proces obróbki pokrywy przekładni AGB, ustalonej i zamocowanej w określonym uchwycie obróbkowym. Czy zaproponowany model kompensacji temperaturowej dotyczy tego jednego przedmiotu na tej obrabiarce, czy wszystkich detali z tego samego materiału, podobnie zamocowanych i obrabianych na tej obrabiarce?
- według mnie rozdział 6.6 „Badanie zmian temperatury podzespołów obrabiarki” powinien być umiejscowiony wcześniej przed rozdziałem „Badanie z wykorzystaniem kolumny wzorcowej”, gdyż w tym rozdziale jest opis wykorzystujący dane z tabeli 6.5 występującej w rozdziale 6.6.
- w rozdziale 6. występują różne wzory o tym samym numerze, brak jednoznacznego określenia w tekście wzorów i ich opisów.
- w rozdziale 6.5 raporty graficzne z pomiarów z wykorzystaniem kolumny wzorcowej przedstawiające odchyłki prostoliniowości przedstawione na rysunkach 6.22-6.28 są mało czytelne, brak komentarzy do nich w tekście.
- opis pozycji literaturowych 6, 31, 35, 36, 44, 54, 110, 114 nie jest zgodny z pozostałymi.

Uwagi szczegółowe

- str. 22, schemat ideowy układu stabilizacji temperatury rysunek 2.1. - opisy w rysunku są nieczytelne.
- str. 48, w.13 – jest **słup obrabiarki** wg mnie powinno być **stojak obrabiarki**;
- str. 62, w.2 – jest **wzór 6.1** powinno być **wzór 6.2**;
- str. 62, w.6 – jest **wzór 6.2** powinno być **wzór 6.3**;
- str. 63, w.1 – jest **wzór 6.3** powinno być **wzór 6.4**;
- str. 63, w.8 – jest **wzór 6.4** powinno być **wzór 6.5**;
- str. 63, w.11 – jest **wzór 6.5** powinno być **wzór 6.6**;

Paul

- str. 64, w.9 – jest **estymowane wzorem 6.5** powinno być **estymowane wzorem 6.6**;
- str. 67, w.7 – jest **wzór 6.2** powinno być **wzór 6.7**;
- str. 70, w.2 – jest **bla osi B** powinno być **dla osi B**;
- str. 123, ostatni wers – jest **realizowanego wzorem 6.2** powinno być **realizowanego wzorem 6.7**;

Mimo tego typu uchybień pracę należy uznać za wykonaną z dużą starannością, co w kontekście realizowanej tematyki ma zasadnicze znaczenie.

3. Wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że mgr inż. Damian Basara zdefiniował, a następnie rozwiązał istotny i aktualny problem naukowy dotyczący wpływu zjawisk termicznych zachodzących w obrabiarce na jej geometrię. W mojej opinii Autor w sposób znaczący przyczynił się do poszerzenia wiedzy w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna, a przede wszystkim w temacie analizy i kompensacji błędów termicznych występujących podczas obróbki detali na obrabiarkach skrawających. Świadczy to o wysokim poziomie naukowym Doktoranta i jednocześnie potwierdza jego gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Damiana Basary nt. „Minimalizacja wpływu temperatury na powtarzalność charakterystyk końcowych części obrabianych na centrach numerycznych z wykorzystaniem kompensacji w czasie rzeczywistym” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą w tym względzie aktualną ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z dnia 20 lipca 2018r. „Prawo o szkolnictwie wyższym”) i stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Może być zatem dopuszczona do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Piotr Boral, prof. PCz
Politechnika Częstochowska