

Łódź, 23.10.2023 r.

dr hab. inż. Wojciech Stachurski, prof. PŁ
Politechnika Łódzka
Wydział Mechaniczny
Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn
ul. Stefanowskiego 1/15
90-537 Łódź

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana BASARY

zatytułowanej:

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

1. PODSTAWA OPRACOWANIA

Podstawę opracowania stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Andrzeja Burghardta prof. PRZ, podyktowane uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 12 lipca 2023 r. (RD IMech Nr 05/07/2023) i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Damiana BASARY pt. „Minimalizacja wpływu temperatury na powtarzalność charakterystyk końcowych części obrabianych na centrach numerycznych z wykorzystaniem kompensacji w czasie rzeczywistym”. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Leszek SKOCZYLAS, prof. PRZ.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska została napisana na 173 stronach maszynopisu formatu A4 w języku polskim i składa się z ośmiu numerowanych rozdziałów, w tym z trzech rozdziałów (1-3) przedstawiających stan wiedzy, rozdziału (4) zawierającego cel i zakres pracy oraz czterech rozdziałów (5-8) stanowiących zasadniczą część badawczą pracy. Poza wymienionymi rozdziałami w pracy zamieszczono także dwa rozdziały nienumerowane: „Wprowadzenie” i „Podsumowanie”. Ponadto recenzowana praca zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń i akronimów, bibliografię, załączniki oraz streszczenie w języku polskim i angielskim, przy



czym abstrakt nie został ujęty w spisie treści. Spis literatury zawiera 143 pozycje, w tym 3 pozycje ze współautorskim udziałem Doktoranta (dwie jako pierwszy autor), powiązane tematycznie z problematyką ocenianej rozprawy doktorskiej.

We wprowadzeniu Doktorant wskazuje na istotność zapewnienia odpowiedniej dokładności wytwarzanych elementów, zwłaszcza w produkcji na potrzeby przemysłu lotniczego. Jednocześnie wskazuje, że jedną z głównych przyczyn wpływających na dokładność geometryczną obrabianych przedmiotów jest ciepło powstające podczas obróbki i towarzyszące temu zmiany temperatury różnych elementów układu OUPN. Niestety występujące w obrabiarkach systemy kompensacji temperaturowej nie zapewniają uzyskania wymaganej dokładności, co w przypadku firmy produkcyjnej, w której zatrudniony jest Doktorant, stanowi poważny problem. Zatem, realna potrzeba poprawy jakości produkowanych części poprzez zmniejszenie błędów spowodowanych wpływami termicznymi w trakcie realizacji procesu obróbkowego stanowi o motywacji podjęcia opisywanych w dysertacji prac badawczych.

W rozdziale pierwszym Doktorant klasyfikuje i omawia błędy występujące podczas obróbki skrawaniem, mające wpływ na dokładność definiowaną jako stopień zgodności gotowej części z wymaganiami geometrycznymi oraz wymiarowymi. Jednocześnie Autor wskazuje, że jako błąd należy rozumieć odchylenie położenia centralnego punktu narzędzia (TCP) od teoretycznie wymaganej wartości zapewniającej wykonanie wyrobu o określonej tolerancji lub z określoną powtarzalnością. Następnie przechodzi do krótkiego omówienia źródeł błędów termicznych obrabiarek z komputerowym sterowaniem numerycznym (w skrócie: obrabiarek CNC) wskazując na to, że czynniki termiczne przyczyniają się do odkształceń elementów obrabiarki, oprzyrządowania oraz uchwytu, co skutkuje niewłaściwym pozycjonowaniem TCP względem obrabianej części.

W kolejnym rozdziale (2) Doktorant szczegółowo przedstawia metody pomiaru temperatury na obrabiarkach CNC oraz zagadnienia związane z pomiarami błędów termicznych i niepewnością pomiaru. Następnie Autor przechodzi do omówienia metod minimalizacji błędów termicznych stosowanych w praktyce, szczególnie dużo miejsca poświęcając na zaprezentowanie metody kompensacyjnej. Doktorant przedstawia wiele inicjatyw badawczych prowadzonych w tym obszarze wskazując jednocześnie, że choć pośrednia kompensacja termiczna daje obiecujące wyniki, to większość z przytoczonych rozwiązań nie znalazła zastosowania przemysłowego. Jednocześnie Autor zaznacza, że analiza literatury potwierdza potrzebę opracowania taniego, niezawodnego oraz przystępnego sposobu redukcji błędów spowodowanych odkształceniami termicznymi obrabiarek CNC, który

powinien być możliwy do zrealizowania w warunkach produkcyjnych, bez dużej ingerencji zarówno w strukturę obrabiarki, jak i strukturę systemu sterowania.

W konsekwencji w ostatnim rozdziale (3) przeglądu literatury Autor przedstawia możliwości rozbudowy układu sterowania CNC o model matematyczny mający służyć kompensacji termicznej położenia TCP. W podrozdziale 3.3 Doktorant kieruje uwagę na możliwość obliczenia parametrów kompensacyjnych z wykorzystaniem akcji synchronicznych, opcji specjalnej jaką udostępnia firma Simens we własnych systemach sterowania CNC. Zaletą tego rozwiązania jest fakt, że parametry kompensacyjne mogą być powiązane z realizowanym procesem obróbczym i w zależności od potrzeb mogą być modyfikowane z poziomu programu. Ponadto, nie wymagają ingerencji w sterownik PLC. Autor przyjął takie rozwiązanie do realizacji pracy.

W kolejnym rozdziale (4) Autor dokonuje ogólnego podsumowania uzasadniającego celowość podjęcia tematu pracy, co pozwoliło Mu postawić tezę:

Wykorzystanie fabrycznych punktów pomiaru temperatury jako sygnału wejściowego modelu błędu termicznego obrabiarki, umożliwi efektywną korektę współrzędnych programów NC poprawiając dokładność obróbki.

W związku z tezą przedstawiono cel pracy, którym jest:

1. Wyszczególnienie istotnych parametrów informujących o korelacji zmian temperatury i przemieszczeń punktu charakterystycznego obrabiarki.
2. Zbudowanie modelu matematycznego przemieszczeń TCP względem punktu bazowego przedmiotu obrabianego bazującego na zmianach temperatury elementów składowych obrabiarki oraz wykorzystywanych środkach eksploatacyjnych.
3. Implementacja opracowanego modelu do systemu sterowania Sinumerik 840D SL z wykorzystaniem akcji synchronicznych.

Realizacja postawionego celu i udowodnienie tezy pracy prowadzono bardzo starannie, o czym świadczy przyjęty zakres badań oraz wykorzystane metody badawcze przedstawione w kolejnych rozdziałach.

W rozdziale (5) Autor przedstawia założenia dotyczące przedmiotu badań oraz szczegółowo omawia stanowisko badawcze oparte o centrum obróbcze mCm iTank 1600, znajdujące się na wyposażeniu firmy produkcyjnej, w której jest zatrudniony. Ponadto przedstawia oprzyrządowanie do pomiaru: dryftu termicznego TCP, geometrii obrabiarki i temperatury. Na szczególną uwagę zwraca fakt prowadzenia automatycznej kontroli geometrii obrabiarki z wykorzystaniem specjalnie do tego celu zaadaptowanej kolumny z powierzchniami i kulami wzorcowymi, tzw. kolumny wzorcowej.

W kolejnym rozdziale (6) Autor obszernie opisuje badania kontrolne wybranej obrabiarki omawiając analizę odkształceń termicznych kolumny wzorcowej, niepewność pomiarów pozycji TCP sondą przedmiotową oraz badania dokładności pozycjonowania osi obrabiarki. W końcowej części rozdziału Autor przedstawia badania geometryczne obrabiarki według wytycznych norm ISO oraz z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, a także badania zmian temperatury podzespołów obrabiarki.

W rozdziale (7) Autor przedstawia sposób wyznaczenia modelu matematycznego do wyznaczenia przemieszczenia TCP w osi Y względem punktu bazowego układu współrzędnych przedmiotu (WKS) w zależności od zmian temperatury podzespołów oraz płynów eksploatacyjnych. W efekcie podaje wzór, który uznaje za możliwy do zaimplementowania w systemie sterowania obrabiarki. Na podstawie podobnie przeprowadzonej procedury wyznaczenia przemieszczenia TCP w osi X, Doktorant uznaje opracowany dla tej osi model za nieuzasadniony do zaimplementowania w systemie sterowania obrabiarki i podaje przyczyny tego stwierdzenia. Dalsze analizy prowadzi tylko w oparciu o model dla osi Y.

W rozdziale (8) Doktorant omawia weryfikację zaproponowanego modelu matematycznego pod kątem możliwości predykcyjnych na niezależnych danych pochodzących z eksperymentów symulujących obróbkę. Następnie proponuje sposób implementacji opracowanego sposobu kompensacji błędów termicznych z wykorzystaniem szeregu akcji synchronicznych typu IDS i testuje w symulatorze Sinutrain. Ostatecznie proponowane przez Autora rozwiązanie zaimplementowano na obrabiarce będącej obiektem badań, a skuteczność opracowanego rozwiązania została pozytywnie zweryfikowana w warunkach produkcyjnych podczas obróbki części testowych.

W ostatnim rozdziale przed bibliografią Doktorant przedstawia podsumowanie pracy oraz formułuje wnioski, wykazując tym samym zrealizowanie celu pracy oraz potwierdzając założoną tezę. W pracy wykazał, że możliwa jest skuteczna kompensacja błędów obróbki wynikających ze zmian temperatury elementów obrabiarki oraz płynów eksploatacyjnych bazując na fabrycznym wyposażeniu obrabiarki. Ponadto, Autor wskazuje zagadnienia wymagające podjęcia dalszych prac badawczych.

3. OCENA POZIOMU NAUKOWEGO I OSIĄGNIĘĆ ROZPRAWY

Recenzowana praca doktorska rozwiązuje problem związany z istotnym, niekorzystnym wpływem zmian temperatury elementów OUPN i płynów eksploatacyjnych na dokładność obrobionych części poprzez opracowanie i implementację metody kompensacji błędów

w systemie sterowania CNC. Opracowana metoda wykorzystuje środki techniczne stanowiące fabryczne wyposażenie obrabiarki, co jest zgodne z wymaganiami stawianymi przez firmę produkcyjną, w której Doktorant zrealizował pracę.

Tematyka badań jest aktualna i interesująca od strony badawczej i aplikacyjnej, w szczególności, że pomimo istnienia wielu metod kompensacji błędów termicznych, zapewnienie odpowiedniej dokładności wytwarzanych elementów jest nadal wyzwaniem dla firm wytwórczych, zwłaszcza w produkcji na potrzeby przemysłu lotniczego. Zatem, przedstawiona dysertacja odpowiada na realną potrzebę technologów, którzy dążą do poprawy jakości produkowanych części poprzez zmniejszenie błędów spowodowanych wpływami termicznymi w trakcie realizacji procesu obróbkowego. Wyniki recenzowanej dysertacji wnoszą nowe elementy do wiedzy w tym zakresie.

Do oryginalnych i wartościowych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- opracowanie metody kontroli podstawowych parametrów geometrycznych oraz ustawczych obrabiarki w celu szybkiej kontroli jej stanu termicznego, opartej na pomiarach artefaktu wzorcowego (tzw. kolumny wzorcowej) z wykorzystaniem sondy pomiarowej oraz cykli pomiarowych.
- wdrożenie powyższej metody w ramach elastycznej linii produkcyjnej, w której zainstalowana jest obrabiarka będąca obiektem badań.
- opracowanie modelu matematycznego przemieszczenia TCP w osi Y względem punktu bazowego układu współrzędnych przedmiotu (WKS) w zależności od zmian temperatury podzespołów oraz płynów eksploatacyjnych.
- wykazanie, że rozwiązanie zaimplementowane w systemie sterowania obrabiarki będącej przedmiotem badań w warunkach produkcyjnych skutecznie minimalizuje wpływ temperatury na powtarzalność charakterystyk końcowych części obrabianych.

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej, mgr inż. Damian Basara podjął się udowodnienia postawionej tezy, stosując w tym celu odpowiednie metody analityczne, eksperymentalne i statystyczne, co w pełni potwierdziło umiejętność doboru technik badawczych i projektowania badań eksperymentalnych, które były logiczne i uporządkowane.

Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Układ jego dysertacji jest logiczny, poprawny i czytelny. Badania zawarte w pracy są celowe i ważne ze względów poznawczych oraz przede wszystkim ze względu na praktyczne ich wykorzystanie poprzez wdrożenie zaproponowanego rozwiązania w firmie, w której zatrudniony jest Autor.

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi wkład Autora w rozwój inżynierii mechanicznej w zakresie kompensacji błędów obróbki na obrabiarkach CNC wynikających ze zmian temperatury elementów OUPN i płynów eksploatacyjnych.

Biorąc pod uwagę powyższe osiągnięcia Doktoranta oraz fakt, że założony cel pracy został osiągnięty wyrażam pozytywną ocenę naukowej wartości recenzowanej rozprawy.

4. UWAGI

Recenzowana rozprawa jest opracowaniem obszernym z zauważalnym podziałem na część studialną, doświadczalną i praktyczną. W tym względzie rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Niemniej, w trakcie czytania i analizowania treści pracy nasunęły mi się uwagi, z których najważniejsze przedstawiam poniżej.

4.1. UWAGI REDAKCYJNE

Układ rozprawy doktorskiej jest poprawny i zawiera elementy stosowane w tego typu pracach. Należy jednak zauważyć, że:

- 1) Spis treści pomija „Abstract of Doctoral Thesis” zamieszczony w pracy na stronie 173.
- 2) Sposób zapisu pozycji źródłowych zamieszczonych w „Bibliografii” sprawia wrażenie sporządzonego niedbale. Jest to związane m.in. z: pomijaniem znaków oddzielających, stosowaniem zapisu nazw czasopism w formie pełnej lub skrótu, występowaniem literówek, błędnym zapisem nazwisk autorów (np. w poz. 52 jest Kosmal zamiast Kosmol, w poz. 85 jest Róaski zamiast Rózański). Ponadto niektóre pozycje w bibliografii nie posiadają pełnych danych bibliograficznych (np. poz. 85).
- 3) W rozprawie znajdują się błędy interpunkcyjne, stylistyczne, edytorskie, które jednak nie mają znaczącego wpływu na pozytywną ocenę pracy. Uwagi zostaną bezpośrednio przekazane Doktorantowi, aby unikał ich w przyszłości.
- 4) Wartość liczbowa powinna być oddzielona spacją od jednostki (zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 5 czerwca 2020 roku w sprawie legalnych jednostek miar, Dz. U. z dnia 10.06.2020 r, poz. 1024).
- 5) Zgodnie z polskim zwyczajem typograficznym separatorem dziesiętnym jest przecinek a nie kropka. Ten błąd występuje w tekście pracy w wielu miejscach.
- 6) Wykresy na rysunkach 6.11÷6.20 są mało czytelne z uwagi na ich zbyt mały rozmiar.
- 7) Wykresy na rysunkach 6.22÷6.28 nie posiadają jednostek w opisach osi.
- 8) Na rys. 6.31 brakuje wyjaśnienia oznaczeń (1, 2, 3) w podpisie rysunku.
- 9) Osie wykresów na rysunkach 7.4÷7.6, 7.11÷7.13 powinny być w języku polskim.

4.2. UWAGI MERYTORYCZNE I DYSKUSYJNE

- 1) Praca zawiera istotne oznaczenia i skróty, które nie zostały ujęte w „Wykazie ważniejszych oznaczeń i akronimów”. Oczywiście ich wybór należy do Autora, jednak w tym wypadku wszystkie nie uwzględnione w „Wykazie...” oznaczenia i skróty powinny być opisane/rozwinęte w tekście pracy, jak np. wskaźnik R&R na stronie 19. Ponadto, wszystkie akronimy zawarte w „Wykazie...” powinny być rozwinęte w języku, z którego zostały zaczerpnięte, jak np. CNC, MKS, RMSE, itd. Uwzględnienie przez Autora większej liczby oznaczeń i akronimów w ich spisie ułatwiłoby percepcję treści obszernego opracowania.
- 2) W celu zwiększenia przejrzystości pracy poszczególne rozdziały powinny kończyć się krótkim podsumowaniem, stanowiącym także uzasadnienie do zamieszczenia kolejnego rozdziału.
- 3) Autor recenzowanej rozprawy umieścił wnioski w rozdziale „Podsumowanie”, co nie ułatwia ich odnalezienia. Praca powinna zawierać rozdział, którego tytuł wskazuje na zamieszczenie w nim wniosków.
- 4) W pracy powinien być umieszczony rozdział „Metodyka badań”, co w znaczący sposób uporządkowałoby treści dotyczące przeprowadzonych badań, użytych stanowisk i metod badawczych.
- 5) Na stronie 13 Autor podaje wartość temperatury wyrażonej w [°K]. W przeciwieństwie do skali Celsjusza, w skali Kelwina nie stosuje się wyrazu *stopień*. Temperatura podawana jest w *kelwinach* [K].
- 6) Na stronie 15 Autor stosuje słowo „detale” w odniesieniu do wytwarzanych części. Zasadniczo termin „detal” jest określeniem slangowym (gwary warsztatowa) i jako taki nie powinien znaleźć się w rozprawie naukowej. Zamiast niego należy używać „przedmiot obrobiony” lub „część”.
- 7) W wielu miejscach pracy Autor używa terminu „narzędzie wykonawcze”. Z kontekstu można wnioskować, że chodzi o „narzędzie skrawające” i ten termin, jako oficjalnie przyjęty w nomenklaturze naukowej, powinien być stosowany w tekście rozprawy. Dodatkowo, na stronie 15 zamieszczono termin „narzędzie walcowe wykonawcze”, który ze względu na przyjęty podział narzędzi według ruchu głównego powinien być zastąpiony terminem „narzędzie obrotowe”.

- 8) Wyjaśnienia wymaga przyczyna, dla której materiał, z którego wykonano kolumnę wzorcową (żeliwo) różni się od materiału płyty (stop aluminium) przeznaczonej do praktycznej weryfikacji zaproponowanego rozwiązania opisanej w podrozdziale 8.4.
- 9) W podrozdziale 6.1 na stronie 55 omówiono analizę MES odkształceń termicznych kolumny wzorcowej. Opis powinien być bardziej rozbudowany i wyjaśniać m.in.:
- jak zbudowany był model dyskretny (siatka, liczba elementów)?
 - jaki model materiału przyjęto i jakie dane materiałowe zostały zaimplementowane do programu numerycznego?
 - czy była modelowana wymiana ciepła pomiędzy płytą a otoczeniem?
 - czy przeprowadzono walidację modelu numerycznego?
- 10) W przypadku dwóch gatunków materiałów oznaczonych w pracy jako: JIS G5501 FC300 (str. 55) i GN2EU (str. 131), w celu łatwiejszej identyfikacji należało podać oznaczenie gatunków w odniesieniu do normy EN lub ISO.

5. PODSUMOWANIE I KONKLUZJA

Na podstawie powyższej opinii pragnę podkreślić oryginalność tematu i trafność doboru odpowiedniej metodyki badań dla założonego celu pracy. Stwierdzam, że mgr inż. Damian Basara wykazał się wiedzą umożliwiającą prowadzenie samodzielnych badań naukowych oraz umiejętnością ich analizy i interpretacji. Pragnę również podkreślić wartości poznawcze opiniowanej dysertacji, a przede wszystkim jej użyteczny wymiar umożliwiający wdrożenie zaproponowanego rozwiązania.

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Basary pt. „Minimalizacja wpływu temperatury na powtarzalność charakterystyk końcowych części obrabianych na centrach numerycznych z wykorzystaniem kompensacji w czasie rzeczywistym”, **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim** określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 roku (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami) i **wnioskuję o dopuszczenie do jej publicznej obrony.**

Z poważaniem

