

**dr hab. inż. Witold HABRAT prof. PRz**

profesor uczelni w grupie pracowników badawczo-  
dydaktycznych

al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

tel. (17) 865 14 91

e mail: witekhab@prz.edu.pl

Rzeszów, 02.01.2025 r.

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Krawczyka pt.

### „Metodyka pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarkach CNC”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Z-cy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr hab. inż. Filipa Górskiego, prof. PP, z dnia 29.10.2024 r. (DIM.075.275.2024).

#### 1 Charakterystyka podjętej tematyki badawczej oraz celu i zakresu pracy

Pomiary gwintów bezpośrednio na obrabiarkach CNC to stosunkowo nowy i aktualny obszar badań, który zyskuje na znaczeniu dzięki rozwojowi w obszarze obrabiarek i technologii obróbki oraz automatyzacji procesów produkcyjnych. Opracowanie nowej metodyki pomiarów może przyczynić się do znaczącego postępu w tej dziedzinie oraz może otworzyć drogę do dalszych badań i innowacji w obszarze inżynierii produkcji, w tym integracji systemów pomiarowych z systemami sterowania CNC oraz zastosowania sztucznej inteligencji do optymalizacji procesów obróbki i kontroli jakości.

Badania w tym obszarze mają duży potencjał zastosowania w przemyśle a opracowane wytyczne mogą znaleźć bezpośrednie zastosowanie w produkcji, przyczyniając się do poprawy jakości wyrobów i redukcji kosztów. Współczesna metrologia dąży do automatyzacji i cyfryzacji procesów pomiarowych. Nowoczesne systemy pomiarowe pozwalają na szybką i precyzyjną kontrolę produkowanych części, co przekłada się na poprawę jakości i wydajności produkcji. Dodatkowa

integracja systemów pomiarowych z obrabiarkami umożliwi pomiar bezpośrednio po procesie obróbki co eliminuje konieczność przenoszenia wytworzonych części do oddzielnych stanowisk pomiarowych i skraca czas cyklu produkcyjnego przy zapewnieniu większej efektywności ekonomicznej.

Tematyka podjęta w recenzowanej rozprawie doktorskiej jest aktualna i mieści się ściśle w obszarze naukowym inżynierii mechanicznej. Skupia się na metodyce pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarkach CNC, co jest istotnym zagadnieniem w nowoczesnej produkcji przemysłowej, szczególnie w przemyśle lotniczym. Kluczowe aspekty wskazujące na aktualność przedmiotowej rozprawy to wpisanie się w trend automatyzacji procesów produkcyjnych, zastosowanie zaawansowanych materiałów, optymalizacje procesów obróbki skrawaniem oraz integracje systemów pomiarowych z obrabiarkami CNC. Praca wpisuje się w trend Przemysłu 4.0, dążąc do opracowania metody automatycznego pomiaru gwintów bezpośrednio na obrabiarce. Warto podkreślić, że badania dotyczą obróbki trudnoskrawalnego stopu Inconel 718, powszechnie stosowanego w przemyśle lotniczym, co przekłada się na aspekt wdrożeniowy realizowanych badań.

Przedmiotem recenzowanej pracy doktorskiej było opracowanie metodyki pomiaru gwintów zewnętrznych stosowanych w produkcji części lotniczych bezpośrednio na tokarkach CNC. Rozprawa doktorska podejmuje aktualną tematykę z zakresu inżynierii mechanicznej, łącząc zagadnienia z obszaru obróbki skrawaniem, metrologii, automatyzacji procesów produkcyjnych oraz inżynierii materiałowej. W tym kontekście **zakres merytoryczny recenzowanej pracy doktorskiej należy ocenić jako istotny. Potwierdza to trafność i sensowność podjętej tematyki badawczej**, która wpisuje się w aktualny zakres badań naukowych w obszarze inżynierii mechanicznej. Uzyskane wyniki pracy mogą mieć istotne znaczenie naukowe i aplikacyjne oraz potencjał wdrożeniowy w przemyśle lotniczym.

**Tytuł pracy jest zgodny z podjętą tematyką badawczą oraz treścią pracy**, choć w mojej ocenie można byłoby go doprecyzować wskazując, że praca dotyczy pomiarów współrzędnościowych. **Cel pracy** podany na str. 35, dotyczący opracowania i wdrożenia metody pomiaru gwintów zewnętrznych, która będzie mogła być zastosowana bezpośrednio na tokarce CNC i umożliwić powtarzalny pomiar gwintu, automatyczne korygowanie nastaw narzędzia skrawającego na podstawie wyników pomiaru, zwiększenie wydajności produkcji, monitorowanie jakości gwintów, eliminację błędów pomiarowych związanych z czynnikiem ludzkim, skrócenie czasu pomiaru i przestoju maszyny oraz wdrożenie filozofii „*closed door machining*”, **należy uznać za trafny i w miarę jasno sprecyzowany**, choć dyskusyjne jest użycie sformułowania „opracowanie metody pomiaru”. Uwzględniając temat pracy i zakres pracy jest to raczej opracowanie „metodyki pomiaru”. Dalej Doktorant formułuje tezę badawczą (a w zasadzie hipotezę), że wprowadzenie pomiaru gwintu bezpośrednio na obrabiarce, przy zachowaniu wymagań dokładnościowych, pozwoli na skrócenie

czasu obróbki oraz zachowanie zasady „*closed door manufacturing*”. W tym kontekście bezpieczniej byłoby odnieść się do całkowitego czasu produkcji, gdyż skrócenie czasu pomiarów wpływa na czasy pomocnicze.

Pewnym mankamentem jest brak czytelnego wyodrębnienia planu badań i zakresu pracy. Z uwagi na szeroki zakres rozprawy, opracowanie tabelarycznej formy lub schematu w tym zakresie ułatwiłoby analizę wyników badań. Trzeba jednak zauważyć, że **zakres pracy jest zasadniczo spójny i ściśle powiązany z tematem dysertacji.**

## 2 Zakres i ocena poszczególnych części realizowanej pracy

Dysertacja została zrealizowana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, której pracownicy znani są m.in. ze znaczącego dorobku naukowego w zakresie szeroko rozumianej inżynierii produkcji. **Strukturę rozprawy** stanowi 6 numerowanych rozdziałów, w tym wprowadzenie oraz podsumowanie. Ponadto praca zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Układ pracy jest zasadniczo prawidłowy choć mam pewne uwagi co do nazewnictwa podrozdziałów. Przykładowo, nazwa rozdziału 2.3 odnosi się do „metodyki” pomiaru gwintów zewnętrznych, podczas gdy podrozdziały 2.3.1 i 2.3.2 dotyczą „metod” pomiaru. Czytając prace odnosi się wrażenie, że Autor traktuje pojęcia „metoda” i „metodyka” jako synonimy, podczas gdy „metoda” to konkretny, świadomie stosowany sposób postępowania, który ma na celu osiągnięcie określonego rezultatu, a „metodyka” to zbiór zasad, metod i procedur dotyczących wykonywania jakiejś pracy, obejmuje szerszy zakres działań niż pojedyncza metoda.

**We wprowadzeniu do pracy (rozdział pierwszy)** Autor wskazał na znaczenie połączeń gwintowych w przemyśle, szczególnie w branży lotniczej, oraz przedstawił historię rozwoju technologii wytwarzania gwintów. Określił wyzwania związane z obróbką gwintów w trudnoskrawalnych materiałach stosowanych w silnikach odrzutowych. Wskazał dążenie w kierunku automatyzacji i wdrażania koncepcji Przemysłu 4.0, w tym technologii „*closed door machining*”. Autor podkreślił, że opracowanie metodyki pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarkach CNC stanowi unikalne na skalę światową rozwiązanie, które może istotnie wpłynąć na efektywność i jakość produkcji w przemyśle lotniczym.

W **rozdziale drugim** Autor przedstawił analizę stanu wiedzy dotyczącą gwintów i ich wytwarzania. Rozpoczął od omówienia podstaw teoretycznych i podziału gwintów, prezentując ich definicje, rodzaje i zastosowania. Następnie szczegółowo przeanalizował różne metody wytwarzania gwintów, w tym obróbkę plastyczną, toczenie, gwintowanie, frezowanie i szlifowanie. Autor skupił się szczególnie na toczeniu gwintów, omawiając rodzaje płytek skrawających, strategie obróbki i

problemy wytwórcze występujące w przemyśle lotniczym. W dalszej części rozdziału przedstawił metody pomiaru gwintów zewnętrznych, zarówno metody stykowe jak i bezstykowe. Omówił również zagadnienia związane z pomiarami na obrabiarkach, w tym systemy pomiarowe w koncepcji Przemysłu 4.0, obrabiarkowe głowice pomiarowe oraz problemy związane z pomiarami w trakcie procesu (*in-process measurement*). Rozdział kończy się podsumowaniem stanu wiedzy w omawianym obszarze.

W **rozdziale trzecim** został określony cel pracy i hipoteza pracy. Ocenę tej części przedstawiono we wcześniejszym punkcie recenzji.

**Czwarty rozdział pracy** dotyczy badań wstępnych gwintów zewnętrznych wykonanych na próbkach z trudnoskrawalnego stopu Inconel 718. Doktorant przeprowadził analizę topografii powierzchni trzech typów gwintów (UNJ, ACME i BUTTRESS) przy dwóch różnych prędkościach skrawania, wykorzystując mikroskop różnicowania ogniskowego. Badanie to pozwoliło na ocenę jakości powierzchni gwintów poprzez analizę parametrów chropowatości takich jak Sa, Sq, Ssk, Sku, Sp, Sv i Sz. Zauważył on różnice w jakości powierzchni w zależności od typu gwintu i kierunku skrawania. Przeprowadzono również badania metalograficzne tych samych typów gwintów, analizując ich mikrostrukturę przy użyciu mikroskopu optycznego. Badania te ujawniły zmiany w morfologii mikrostruktury warstwy wierzchniej w pobliżu powierzchni gwintów, szczególnie w obszarach dna wrębu i krawędzi. Autor zwrócił uwagę na różnice w formowaniu się wyplwynek materiału w zależności od typu gwintu i zastosowanej płytki skrawającej. Przeprowadzone badania wstępne dostarczyły istotnych informacji do badań zasadniczych na temat jakości powierzchni i mikrostruktury materiału gwintów.

Zawartość ocenianego rozdziału jest logiczna i prezentuje dobry poziom merytoryczny. Pozostaje jednak kilka kwestii dyskusyjnych:

- *Na str. 46 Autor wskazuje na odmienne cechy „strukturalne” materiału – chyba chodziło w tym przypadku o analizę „mikrostruktury”.*
- *Doktorant nie odniósł uzyskanych wyników do konkretnych wymagań jakościowych dla gwintów lotniczych, co utrudnia ocenę praktycznego znaczenia badań. Czy w tym kontekście ilościowa analiza zmian mikrostruktury (np. ocena głębokości warstwy odkształconej) nie byłaby zasadna?*
- *Nie przedstawiono szczegółowej technologii nacinania gwintu. Podano jedynie kilka ogólnych informacji dotyczących procesu toczenia gwintów np. że zastosowano strategię dosuwu promieniowego o zmiennym stopniu wgłębienia, w celu utrzymania stałego przekroju warstwy podczas procesu skrawania. Jednak podział naddatku (np. liczba przejść, naddatek średnicowy, głębokość ostatniego przejścia) wydają się istotnie*

wpływać na topografię powierzchni, chociażby poprzez różne oddziaływanie mechaniczne.

- *Do wytworzenia gwintów zastosowano strategię dosuwu promieniowego o zmiennym stopniu wgłębienia, w celu utrzymania stałego przekroju warstwy skrawanej. Nie uzasadniono jednak wyboru ani nie odniesiono się do innych możliwych metod wcinania. Czy wynikało to z doświadczeń lub ograniczeń przemysłowych, czy możliwości w zakresie cykli obróbkowych nacinania gwintów?*

W rozdziale piątym Autor przedstawił badania zasadnicze dotyczące opracowania metodyki pomiaru gwintów zewnętrznych bezpośrednio na tokarce CNC.

Rozdział ten w pierwszej części obejmuje badania z zastosowaniem czujnika laserowego liniowego, analizując jego przydatność do pomiaru gwintów. Następnie Doktorant zbadał dokładność i powtarzalność pozycjonowania obrabiarki WFL M40, co wydaje się być kluczowe dla możliwości realizacji tego rodzaju precyzyjnych pomiarów. Kolejna część dotyczyła porównania różnych głowic pomiarowych pod kątem ich zastosowania do pomiaru gwintów. Autor skupił się szczególnie na opracowaniu metodyki pomiaru średnicy podziałowej gwintu na obrabiarce CNC przy użyciu głowicy stykowej. Przeprowadził szereg eksperymentów, analizując wpływ różnych czynników na dokładność pomiaru. W ostatniej części rozdziału zajął się szacowaniem niepewności pomiarowej opracowanej metody. Rozdział kończy się wnioskami z przeprowadzonych badań zasadniczych, podsumowującymi osiągnięte rezultaty i wskazującymi na potencjał opracowanej metodyki pomiaru gwintów bezpośrednio na obrabiarce.

W analizie tego rozdziału można dopatrzeć się pewnych niedoskonałości polegających na braku jednoznacznego uzasadnienia wyboru konkretnych metod pomiarowych. Autor mógłby lepiej wyjaśnić, dlaczego zdecydował się na badanie czujnika laserowego, głowic stykowych i metody trójwałeczkowej. Ograniczona liczba wytworzonych próbek może wpływać na wiarygodność wyników, a jej zwiększenie mogłoby dać pełniejszy obraz. Zasadniczo jednak zawartość merytoryczna prezentuje dobry poziom i jest wartościowa pod względem aplikacyjnym. Poniżej przedstawiono kilka kwestii dyskusyjnych:

- *Rozdział 5 (podobnie jak rozdz. 4) powinien mieć wyodrębniony podrozdział z zestawieniem warunków badań doświadczalnych. Ułatwiłoby to analizę i zwiększyło czytelność pracy.*
- *Brakuje planu badań w formie graficznej, który ułatwiłby analizę treści.*
- *Czy w przypadku pomiarów czujnikiem laserowym, poszukiwanie właściwego przekroju znacznie wydłuża czas pomiaru?*

- Czy w odniesieniu do tego rodzaju badań stosuje się matowienie części na obrabiarce?
- Czy porównano wyniki pomiarów gwintów głowicami pomiarowymi na maszynie współrzędnościowej CMM i obrabiarce CNC (w pracy nie jest to czytelnie określone)?
- Jakie są potencjalne ograniczenia i wady zaproponowanej metodyki pomiaru średnicy podziałowej gwintu na obrabiarce CNC?
- Czy uwzględniono możliwości implementacji określonych metod pomiarów w rzeczywistych warunkach produkcyjnych z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych?
- Proszę scharakteryzować poszczególne składowe opracowanej metodyki pomiaru gwintów zewnętrznych, które zostały zaimplementowane we wdrożeniu przemysłowym.

Dysertacja kończy się **podsumowaniem i wnioskami końcowymi**, w których można znaleźć zarówno wnioski poznawcze, użyteczne, jak i wnioski do dalszych badań. Opracowana metodyka pomiaru gwintów ma znaczenie praktyczne. Autor stwierdza, że wyniki dowiodły, iż automatyzacja pomiarów gwintów na obrabiarkach CNC jest możliwa i może znacząco poprawić efektywność produkcji oraz jakość końcowych produktów.

Wnioski sformułowane na końcu pracy są uzasadnione przeprowadzonymi badaniami i mają istotne znaczenie praktyczne.

**Literatura** zamieszczona w pracy jest aktualna i obszerna. Doktorant odwołuje się do 164 pozycji, w tym 13 współautorskich.

Praca jest w miarę staranna i na dobrym poziomie. Autor ma jednak tendencję do obszernej formy opisowej, co nie zawsze jest łatwe w analizie. Występują drobne błędy o charakterze stylistycznym i redakcyjnym, które jednak swoją liczbą nie odbiegają od średniej tego rodzaju opracowań i nie wpływają na ogólną ocenę pracy, przykładowo:

- str. 29 – opis na rys. 2.20 powinien być przetłumaczony,
- str. 42 – zamiast „rys. 4.6, rys. 4.7, rys. 4.8.” – powinno być „rys. 4.6-4.8),
- wszystkie nazwy angielskie powinny być wyróżnione kursywą np. „*in-process measurement*”,
- str. 49 - niefortunne zdanie „badanie (...) nie spowodowało powstania (...)” – powinno być „nie wykazało”,
- str. 50 – niefortunny zwrot „wytoczonych”,
- str. 55 – niefortunny zwrot „na obrazku”.

### 3 Ogólna ocena pracy

Doktorant podjął się istotnego zagadnienia opracowania metodyki pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarkach CNC. Należy zaznaczyć, że **cel rozprawy został osiągnięty**, a merytoryczna część pracy jest na dobrym poziomie. Faktem jest, że brakuje na końcu pracy wyodrębnienia tej metodyki, ale można odnaleźć ją w treści pracy.

Pod względem edytorskim praca napisana jest poprawnym językiem a sformułowane zdania nie stwarzają problemów z płynnością czytania i analizy. Zamieszczone w pracy rysunki wykonane są z akceptowalną starannością i mają swoje uzasadnienie w tekście. Pewne drobne błędy stylistyczne, literowe czy redakcyjne nie umniejszają jakości dysertacji, nie mogą więc stanowić podstawy do kwestionowania wartości pracy. Pod względem metodologii prowadzenia badań rozprawa jest poprawna. Literatura jest aktualna i dobrana zgodnie z tematem pracy. Układ rozprawy i podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest zasadniczo logiczny. Autor posługuje się właściwymi pojęciami.

Z przedstawionej powyżej oceny poszczególnych części dysertacji wynika, że praca jest oryginalna, logiczna i spójna merytorycznie. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną i umiejętnościami w prowadzeniu badań naukowych w **dyscyplinie inżynieria mechaniczna**. Przedstawiona powyżej ocena potwierdza oryginalność opracowanego w pracy zagadnienia naukowego.

### 4 Wniosek końcowy

W mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska **przyczynia się do poszerzenia wiedzy w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna**, a przede wszystkim w zakresie strategii pomiarów współrzędnościowych na obrabiarkach CNC, co przyczynia się do rozwoju metrologii technicznej i efektywności technologii obróbki gwintów.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Krawczyka pt. „Metodyka pomiaru gwintów zewnętrznych na tokarkach CNC”, **spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. Nr 2018 poz. 1668 z późn. zm.) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce**, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria mechaniczna wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 lipca 2018 r. W związku z tym **wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**



