

Dr hab. inż. Krzysztof Żak, prof. PO

Opole, dnia 18.03.2024

Wydział Mechaniczny
Katedra Technologii Maszyn i Materiałoznawstwa
Politechnika Opolska

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Emilii Bachtiak-Radka nt. *Wpływ strategii pomiarowej na ocenę topografii powierzchni przyrządem optycznym z czujnikiem chromatycznym konfokalnym*

Promotor: dr hab. inż. Marcin Chodźko, prof. ZUT

Promotor pomocniczy: dr inż. Daniel Grochała

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie dr hab. inż. Krzysztof Danilecki, prof. ZUT nr WIMiM/13/2024 z dnia 11.01.2024 r.

1. Tematyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Emilię Bachtiak-Radka ściśle związana jest z obszarami inżynierii mechanicznej, skupiając się na metrologii powierzchni. Struktura geometryczna powierzchni odgrywa istotną rolę w jakości współpracujących elementów. Jednakże, gdy mówimy o powierzchni lub strukturze geometrycznej, należy pamiętać o walorach użytkowych, czyli o funkcjonalności tejże powierzchni.

Tematyka podjęta w rozprawie doktorskiej przez panią mgr inż. Emilię Bachtiak-Radka jest aktualna nie tylko z punktu widzenia poznawczego, lecz także w kontekście praktycznym, technologicznym i eksploatacyjnym. Pomimo licznych badań i publikacji dotyczących oceny powierzchni po obróbce przeprowadzonych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, aktualność i oryginalność tematu poruszanego w recenzowanej rozprawie doktorskiej nie podlegają wątpliwości.

Praca doktorska obejmuje badania eksperymentalno-analityczne w zakresie opracowania strategii pomiarowej dla urządzeń z optycznym systemem pomiarowym, które są wyposażone w czujniki konfokalne. Celem jest ustalenie strategii pomiarowej mającej na celu redukcję szumu pomiarowego poprzez właściwy dobór ustawień urządzenia pomiarowego oraz odpowiednie przetwarzanie (analizę) danych pomiarowych.

Należy podkreślić, że istotą podjętej tematyki jest próba ustalenia odpowiedniej strategii pomiarowej do oceny topografii powierzchni (struktury geometrycznej powierzchni) dla urządzeń z czujnikiem chromatycznym konfokalnym która została

zweryfikowana na podstawie wykonanych badań dla próbek po frezowaniu sali C45 o twardości 25 HRC i dwóch różnych urządzeń z czujnikiem chromatycznym konfokalnym.

Podsumowując, podjętą tematykę rozprawy uważam za nowatorską i bardzo ważną w aspekcie pragmatycznym, a w ten sposób oceniam jak najbardziej pozytywnie.

2. Ogólna ocena treści, układu i zakresu rozprawy

Rozprawa liczy 160 stron i składa się z 9 rozdziałów oraz wstępu, spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń i pojęć, spisu literatury obejmującego 160 pozycji, spisu tabel i rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 **Wstęp** do rozprawy doktorskiej, Autorka rozprawy w syntetyczny sposób wyjaśnia czym jest projektowanie wyrobów które muszą spełniać określone wymagania funkcjonalne wraz z tworzeniem dokumentacji technologicznej, która jest kluczowa podczas definiowania warunków pomiaru i kontroli jakości. Natomiast prawidłowy wybór sposobu pomiaru ma istotny wpływ na uzyskanie wiedzy na temat topografii powierzchni czy inaczej mówiąc o strukturze geometrycznej powierzchni (SGP) wyrobu końcowego, która jest kluczowa w wielu dziedzinach nauki i techniki.

Rozdział 2 **Przegląd stanu zagadnienia** zawiera cztery podrozdziały, w których Autorka przedstawia aktualny stan zagadnienia w oparciu o wyniki prac badaczy z różnych ośrodków naukowych krajowych i zagranicznych oraz aktualne normy PN-EN, VDI/VDE, ISO.

W podrozdziale 2.1. Autorka charakteryzuje pojęcie oceny topografii powierzchni z podziałem na powierzchnię rzeczywistą oraz nominalną. Definiuje zgodnie z normą PN-EN ISO 21920-2:2022-06 pojęcia odchyłki kształtu, falistości i chropowatości oraz jakie cechy charakteryzują strukturę geometryczną powierzchni. Jak również definiuje dodatkowe pojęcia takie jak powierzchnia odniesienia, powierzchnia resztkowa czy powierzchnia dyskretna, które pomagają w dokładniejszym opisie powierzchni należy tu również podkreślić dobre zilustrowanie tematyki.

Podrozdział 2.2 przedstawia metody pomiaru topografii powierzchni w którym zgodnie z normą PN-EN ISO 25178-6:2011 autorka sklasyfikowała metody pomiaru chropowatości powierzchni oraz podzieliła je na trzy grupy, natomiast w *Tabeli 2.1 str. 12* przedstawiła ilościowo autorski przegląd artykułów publikowanych w różnych czasopismach i dostępnych w bazie Springera, Elseviera oraz Google Scholar dotyczących zastosowania bezstykowych urządzeń pomiarowych, co pomogło autorce w podjęciu decyzji co do dalszych działań badawczych. Podrozdział 2.2 składa się również dodatkowego podrozdziału 2.2.1 w którym autorka opisuje historię powstania mikroskopii konfokalnej i chromatycznej mikroskopii konfokalnej jak również sposób jej działania ilustrując rysunkami.

W kolejnym podrozdziale 2.3 dotyczącym sposobów badania topografii powierzchni za pomocą optycznych systemów pomiarowych autorka zajęła się zagadnieniem wpływu strategii pomiarowej które podzieliła po analizie norm na 6 grup poczynając od kalibracji czujnika a kończąc na interpretacji wyników. Słusznie w mojej opinii autorka wskazuje na str. 19, że „...**brak jest obecnie standardów dotyczących realizacji pomiarów topografii powierzchni i analizy cyfrowej uzyskanych danych pomiarowych**”. Świadczy to o dobrym przeglądzie literatury naukowej jak i norm dotyczących tematu pracy doktorskiej.

Podrozdział 2.4 dotyczy motywacji do badań nad opracowaniem strategii pomiarowej z użyciem chromatycznej głowicy konfokalnej która wynika z praktycznych potrzeb braku jakichkolwiek standardów dotyczących realizacji pomiarów stwierdziła co autorka podniosła w podrozdziale 2.3. Dzięki przeglądowi literatury dotyczącej tematyki pracy autorka wykazała przewagę mikroskopii konfokalnej nad innymi optycznymi systemami pomiarowymi jak również trafnie stwierdziła **że rozwój nowych materiałów i technologii wpływa na rosnące zapotrzebowanie na precyzyjne pomiary topografii powierzchni**, a prowadzone badania pomogą w doskonaleniu techniki pomiarowej jak i jej optymalizacji.

Podsumowując rozdział 2 rozprawy mogę stwierdzić, że Autorka w sposób wyczerpujący i interesujący dla czytelnika przedstawił przegląd stanu zagadnienia dotyczący problematyki pomiarów i oceny topografii powierzchni jak również w mojej opinii charakterystyka tych zagadnień została przeprowadzona prawidłowo, stanowiąc duży wkład w opracowany przegląd literatury.

W rozdziale 3 pracy, autorka sformułowała jedną tezę, podstawowy cel pracy który został podzielony na 6 celów szczegółowych oraz zakres pracy składający się z 7 punktów. W mojej opinii główny cel jak i cele szczegółowe oraz teza pracy zostały sprecyzowane szczegółowo i jednoznacznie.

Następny, 4 rozdział rozprawy dotyczył koncepcji strategii pomiarowej oceny topografii powierzchni, która została podzielona na trzy etapy, należy podkreślić, że jest to autorska koncepcja podejścia do badań wynikająca z przeglądem literatury.

W podrozdziale 4.1 autorka przedstawiła stanowisko badacze wyposażone w profilometr optyczny 3D AltiSurf A520 firmy Altimet oraz w *Tabeli 4.1 str. 25* przedstawiła podstawowe dane techniczne czujników konfokalnych w które wyposażone jest urządzenie następnie krótko zaprezentowano zastosowane wzorce chropowatości na których prowadzono prace badawcze oraz oprogramowanie wykorzystane do analizy danych pomiarowych. Dzięki szerokiemu przeglądowi literatury autorka wybrała 13 parametrów skupionych w trzech grupach przedstawionych w *Tabeli 4.2 na str. 27 i 28* takich jak: parametry wysokościowe (Sq,

Ssk, Sku, Sp, Sv, Sz i Sa); parametry przestrzenne (Sal, Str i Std); parametry funkcyjne (Spk, Svk i Sk) które następnie scharakteryzowała oraz zdefiniowała.

W rozdziale 5 rozprawy Doktorantka opisała przyjęte pojęcie chmury punktów rozumiane jako surowe dane uzyskane podczas pomiaru nie poddane obróbce cyfrowej jak również zaproponowała sposób doboru najkorzystniejszych parametrów które oparto na trzech kryteriach takich jak: współczynnik zmienności Vs w %, drugim kryterium jest analiza statystyczna oparta na metodzie wariancji w skrócie ANOVA (Analysis of Variance), a trzeci etap to walidacja otrzymanych wyników. W podrozdziale 5.1 **Program badań doświadczalnych** autorka wybrała potencjalne cztery czynniki które mogą mieć istotny wpływ na prowadzone pomiary i można je w miarę możliwości kontrolować, a następnie w *Tabeli 5.1 str. 31* scharakteryzowała je oraz w *Tabeli 5.2 str. 32* przedstawiła plan eksperymentu w rzeczywistymi wartościami wejściowymi.

Podrozdziale 5.2 autorka zaprezentowała wyniki oraz analizę badań zgodnie z przyjętym programem badawczym rozprawy doktorskiej. Wyniki badań zostały zaprezentowane graficznie na mapach konturowych, wykresach izotropowości powierzchni, wykresach krzywej udziału materiałowego jak i wartości pomiarów wraz z powtórzeniami i obliczeniami statystycznymi zostały zestawione w tabelach. W *Tabeli 5.138 str. 88* autorka zestawiała plan eksperymentu z danymi pomiarowymi takimi jak czas ustawienia urządzenia i liczbą niezmiernych punktów **trafnie oceniając że nie udało się kontrolować wszystkich parametrów związanych z pomiarem, a otrzymane wyniki były wynikiem podjętej decyzji przez operatora.** Po całościowej analizie otrzymanych wyników badań autorka do dalszych analiz wybrała plan nr 2 eksperymentu. W podrozdziale 5.3 autorka przedstawiła wyniki obliczeniowe przeprowadzone w oprogramowaniu STATISTICA analizując wpływ czynników głównych Wp, fvx, fvy i Vf wybranych parametrów chropowatości 3D (Sq, Sa, Sz, Sal, Str, Sk Spk i Svk). Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabelach i przedstawiono na wykresach.

Autorka w podrozdziale 5.4 zaprezentowała wyniki walidacji wyników pomiarowych za pomocą metody wnioskowania unitaryzacji zerowanej, a następnie autorka opisała jakie postulaty stawia się metodą normalizującym jak również wybrała do oceny cztery czynniki które są jej zdaniem ważne dla operatorów maszyn pomiarowych. Następnie autorka przedstawiła swoje autorskie zalecenia dotyczące nastaw przyrządu optycznego z czujnikiem chromatycznym konfokalnym zaprezentowane na str. 100.

Podsumowując rozdział 4 i 5 rozprawy mogę stwierdzić, że Autorka w sposób przejrzysty przedstawiła koncepcję badań oraz bardzo wyczerpująco i interesująco dla czytelnika przedstawił wyniki uzyskanych badań, należy tu podkreślić dla 27 układów badawczych i analiz statystycznych formułując **autorskie zalecenia** dotyczące nastaw dla przyrządu optycznego z czujnikiem chromatycznym konfokalnym.

W rozdziale 6 Doktorantka zajęła się oceną wpływu cyfrowej obróbki danych pomiarowych wykorzystując do tego oprogramowanie AlitiMap Premium 6.2 i przedstawiła w *Tabeli 6.1 str.102* plan z opisem dokonywanych operacji na danych pomiarowych jak i w *Tabeli 6.2 str. 103* plan eksperymentu z zakresami zmienności wykorzystując do tego celu oprogramowanie STATISTICA. W podrozdziałach 6.2 do 6.5 przedstawiła wyniki badań i analiz statycznych dla wcześniej wybranego planu nr 2 eksperymentu.

Dzięki przeprowadzonym analizą autorka zaprezentowała **autorskie zalecenia** cyfrowego przetwarzania danych pomiarowych co jest kluczowe w uzyskiwaniu poprawnych wyników pomiarowych.

W rozdziale 7 pod tytułem **Strategia pomiarowa oceny topografii powierzchni dla przyrządu optycznego z czujnikiem chromatycznym konfokalnym** autorka przedstawiła w autorską zalecenia w jaki sposób dokonywać pomiarów na tego typu urządzeniach trafianie je argumentując jak również przedstawiła za pomocą schematu blokowego zaproponowaną strategię.

W rozdziale 8 Autorka przeprowadziła weryfikację autorskiej strategii pomiarowej wykonując pomiary dla próbki po frezowaniu stali C45 o twardości 25 HRC. Pomiary chropowatości powierzchni przeprowadzono dla dwóch typów maszyn pomiarowych z czujnikiem chromatycznym konfokalnym.

Rozdział 9 przedstawia **Wnioski** które stanowią podsumowanie rozprawy doktorskiej. Doktorantka sformułowała wniosek, że wszystkie cele pracy zostały osiągnięte, a teza udowodniona. Można również stwierdzić, że osiągnięte wyniki badań zostały przejrzysto ukazane po przez podzielenie ich na wnioski z pracy (12 wniosków) oraz wnioski na przyszłość (4 wnioski) które zostały dobrze wyjaśnione.

Bibliografia obejmuje zestawienie łącznie 160 pozycji, zarówno książek, artykułów naukowych, źródeł internetowych oraz norm ISO. **Dobór literatury uważam za poprawny i aktualny.** W bibliografii można również znaleźć opracowania współautorskie mgr inż. Emilii Bachtia-Radka.

Ogólna kompozycja rozprawy zasługuje na ocenę pozytywną. Autorka poprawnie przyjął kolejność rozdziałów i w większości przypadków dokonał prawidłowego podziału treści na rozdziały i podrozdziały. W pracy napotkałem w moim odczuciu na pewien brak co dla czytających może stanowić utrudnienie oraz zrozumienie, a także nieścisłości (do których odniosę się w dalszej części recenzji).

Niniejsze niedoskonałości mają jednak znaczenie drugorzędne i nie umniejszają znaczących walorów naukowych pracy.

Podsumowując ogólną ocenę treści rozprawy chciałbym przedstawić jej najważniejsze zalety naukowe, wskazujące jednocześnie na osiągnięcia naukowe autorki:

- opracowanie autorskiego zalecenia dotyczącego nastaw dla przyrządu optycznego z czujnikiem chromatycznym konfokalnym,
- opracowanie autorskiego zalecenia cyfrowego przetwarzania danych pomiarowych,
- opracowanie autorskiej strategii pomiarowej oceny topografii powierzchni dla przyrządu optycznego z czujnikiem chromatycznym konfokalnym,

3. Uwagi do rozprawy doktorskiej

W niniejszej części recenzji zaprezentuję pewne uwagi, a także fragmenty rozprawy wymagające dodatkowych komentarzy i wyjaśnień ze strony Autorki. Chciałbym zaznaczyć, iż w większości przypadków uwagi te mają charakter dyskusyjny, a nie stanowią bezpośredniego stwierdzenia niedociągnięć lub błędów.

- **Rozdział 4.1. „Stanowisko badawcze”, str. 24:** zdanie: *„Do celów badawczych przygotowano wzorzec chropowatości powierzchni typu C1”*. Pytanie kto przygotował? Były wykonane na zamówienie? To są wzorce zakupione i brakuje dokładnego opisu wzorców opis, co by jeszcze wzbogaciło pracę, a obecne opisy są bardzo lakoniczne moim zdaniem. Warto było załączyć certyfikat wzorcowania dla tych wzorców.
- **Rozdział 5. „Ocena wpływu warunków akwizycji chmury punktów czujnikiem chromatycznym konfokalnym na wartości wybranych parametrów GPS”, str. 30:** zdanie: *„Drugim kryterium stanowiły wyniki analizy wariancji (ANOVA), mającej na celu identyfikację statystycznie istotnych wpływów parametrów nastaw przyrządem optycznym z czujnikiem chromatycznym konfokalnym na parametry GPS”*. Proszę wyjaśnić, dlaczego wybrała Pani tą metodę statystyczną, ponieważ trudno doszukać się takiej informacji w treści pracy.
- **Rozdział 5.3 „Identyfikacja wpływu sposobu akwizycji chmury punktów na parametry GPS”, str. 92:** zdanie: *„Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$ w celu weryfikacji hipotez H_0 o braku istotności wpływu parametrów nastaw na parametry GPS”*. Na podstawie czego ten poziom Pani ustaliła i dlaczego ten?

- **Rozdział 9. „Wnioski”, str. 136:** stwierdzenie: *„Jak dowiedziono, obecnie najczęściej stosowane technologie pomiaru opierają się na systemach optycznych, wyposażonych w konfokalne czujniki chromatyczne (światła białego)”*. Muszę się z tym stwierdzeniem nie zgodzić, ponieważ jest jedną z technik pomiarowych, a na rynku mamy do dyspozycji wiele innych równie popularnych technik jak Focus Variation czy technika interferometryczna.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że mgr inż. Emilii Bachtiak-Radka zdefiniował, a następnie rozwiązała istotny i aktualny problem naukowy dotyczący Wpływu strategii pomiarowej na ocenę topografii powierzchni przyrządem optycznym z czujnikiem chromatycznym konfokalnym.

W ramach badań własnych opracowała autorskiego zalecenia których sformułowanie wymagało od Autorki dużej wiedzy związanej z technologią obróbki jak i metrologią powierzchni oraz bardzo dobrej znajomości środowiska oprogramowania STATISTICA. Świadczy to o wysokim poziomie naukowym Doktorantki i jednocześnie potwierdza jej gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Emilii Bachtiak-Radka pt. Wpływ strategii pomiarowej na ocenę topografii powierzchni przyrządem optycznym z czujnikiem chromatycznym konfokalnym w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz umożliwia sformułowanie wniosku o spełnieniu warunków określonych ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20.07.2018 r. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Dodatkowo, ze względu na bardzo wysokie walory naukowe i nowatorstwo rozprawy wnoszę o wyróżnienie jej Autorki mgr. inż. Emilii Bachtiak-Radka.

