

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Świdierskiego
nt. **Opracowanie koncepcji badań porównawczych przyrządów do oceny
chropowatości powierzchni w aspekcie niepewności pomiaru**

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Stępień, prof. PŚk
Promotor pomocniczy: dr inż. Damian Gogolewski

Istotność problematyki rozprawy

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni należą do istotnych dziedzin współczesnej metrologii. Podstawową przyczyną pomiaru struktury geometrycznej powierzchni jest kontrola procesu wytwarzania. Parametry chropowatości powierzchni stosowane są do monitorowania zmian struktury geometrycznej powierzchni zachodzących w trakcie produkcji. Drugą, możliwe że bardziej istotną przyczyną, jest zrozumienie i przewidywanie właściwości funkcjonalnych powierzchni. Jest ona bowiem połączeniem pomiędzy procesem wytwarzania a właściwościami funkcjonalnymi części maszyn. Największe znaczenie struktura geometryczna powierzchni wywiera na problemy styku, a co za tym idzie przyczepności, sztywności, przewodnictwa. Kolejną dziedziną są problemy występujące podczas wzajemnego ruchu powierzchni (tarcia, smarowanie i zużycia). Wpływ chropowatości na wytrzymałość zmęczeniową jest również istotny.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni są bardzo podatne na błędy. Istnieje wiele metod pomiarów, z których najstarszą i najbardziej znaną (od około 90 lat) jest metoda stykowa. Głowica pomiarowa przyrządu przesuwana się wzdłuż mierzonego profilu ze stałą prędkością. Ostrze odwzorowujące dzięki naciskowi pomiarowemu styka się z powierzchnią mierzonego przedmiotu. Zmiany położenia ostrza odwzorowującego w kierunku prostopadłym do kierunku przesuwu są zamieniane w przetworniku na sygnał elektryczny. Sygnał ten może być zarejestrowany lub poddany dalszemu opracowaniu. Pomiary stykowe są najlepiej poznane ze wszystkich metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni. Metoda ta opisana w wielu publikacjach jest najczęściej stosowana w praktyce przemysłowej. Odpowiedni poziom wiarygodności wyników pomiarów chropowatości powierzchni jest konieczny zarówno podczas prowadzenia badań naukowych jak i kontroli procesu wytwarzania. Z tego względu podjęcie tematyki niniejszej pracy jest w pełni uzasadnione.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt. „Opracowanie koncepcji badań porównawczych przyrządów do oceny chropowatości powierzchni w aspekcie niepewności pomiaru” obejmuje istotne zagadnienia z punktu widzenia inżynierii mechanicznej, a w szczególności metrologii technicznej.

Omówienie rozprawy doktorskiej

Praca zawiera łącznie 180 stron tekstu i obejmuje: stronę tytułową, podziękowania, spis treści, sześć głównych rozdziałów podzielonych na podrozdziały, wnioski końcowe, literaturę, spis rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym przedstawiono rys historyczny pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, pokazano wybrane przykłady ich zastosowań na podstawie wyników badań Autora tej rozprawy. Zaprezentowano ponadto klasyfikację metod pomiarów stereometrii powierzchni wraz z przeglądem profilometrów stykowych. Przedstawiono parametry struktury geometrycznej powierzchni w ujęciach 2D i 3D. Zaprezentowano także wzorce materialne i programowane stosowane w sprawdzaniu urządzeń do pomiarów chropowatości powierzchni i oprogramowania.

Rozdział drugi przedstawia aktualny stan wiedzy w zakresie spójności pomiaru struktury geometrycznej powierzchni. Opisano źródła błędów w pomiarach stykowych chropowatości powierzchni. Ciekawy był podrozdział poświęcony między-laboratoryjnym pomiarom porównawczym struktury geometrycznej powierzchni. Niestety, nie zaprezentowano wniosków z analizy literatury.

W rozdziale trzecim zaprezentowano cele pracy. Podstawowym celem pracy było „opracowanie koncepcji badań porównawczych przyrządów stykowych z ostrzem odwzorowującym przeznaczonych do pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, zapewniającej najmniejszą możliwą do osiągnięcia niepewność definicyjną”. Zaprezentowano również pięć celów szczegółowych oraz sposób realizacji pracy. Jedynie cele czwarty i piąty są poświęcone profilom chropowatości powierzchni. Należałoby to uszczegółwić. Przykładowo przedstawiono jedynie wyniki badań porównawczych profili nierówności, zaś cel pierwszy dotyczy struktury geometrycznej powierzchni. Jednak w pracy analizowano źródła błędów występujących przy pomiarach stereometrii powierzchni. Praca nie zawiera hipotezy badawczej.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań źródeł błędów pomiarów struktury geometrycznej powierzchni metodą stykową. Uwzględniono między innymi stan ostrza odwzorowującego, nacisk pomiarowy, krok próbkowania, błąd kwantyzacji, możliwość utraty kontaktu końcówki pomiarowej z powierzchnią, szum pomiarowy, powtarzalność parametrów oraz oprogramowanie.

W rozdziale piątym przedstawiono koncepcję badań porównawczych przyrządów do oceny chropowatości powierzchni. Opisano przygotowanie przyrządu do pomiarów, dobór próbek, warunki pomiarów, karty pomiarowe, szacowanie niepewności pomiarów oraz opracowanie wyników.

Rozdział szósty zawiera wnioski oraz kierunki dalszych badań.

Spis literatury zawiera 77 pozycji, w tym również publikacje Autora rozprawy. Zaprezentowano także 30 norm, dokumenty oraz strony internetowe.

Układ, treść i zakres recenzowanej rozprawy doktorskiej uważam za prawidłowy. Korzystna byłaby zmiana proporcji objętości analizy literatury i badań własnych. Analiza literatury powinna, moim zdaniem, zajmować najwyżej jedną trzecią pracy. Można byłoby na przykład zrezygnować z

przedstawienia niektórych parametrów stereometrii powierzchni, ponieważ analiza dotyczy głównie profili lub skrócić rozdział dotyczący rodzajów metod pomiaru. Podobny przegląd został przedstawiony ostatnio w wielu pracach. Można było również skrócić nieciekawe podrozdziały dotyczące spójności i niepewności pomiarowej. Objętość niektórych podrozdziałów z części praktycznej pracy mogłaby zostać zwiększona. Praca ma charakter eksperymentalny. Korzystne byłoby zastosowanie modelowania, na przykład wpływu szumu pomiarowego lub promienia zaokrąglenia końcówki pomiarowej na wyniki pomiarów profili powierzchni obrabianych. Można w tym celu wykorzystać program TalyMap. Zazwyczaj nie dokonano dyskusji wyników badań przez ich porównanie z rezultatami dostępnymi w literaturze. W niektórych przypadkach (na przykład w podrozdziale dotyczącym wpływu prędkości przesuwu ostrza na wyniki pomiaru) warto przedstawić podsumowanie na końcu podrozdziału.

Niektóre rysunki są nieczytelne, czcionki są zbyt małe. Podpisy nie zawsze opisują wystarczająco rysunków. Niektóre rysunki i tabele zawierają słowa w języku angielskim. Praca napisana jest poprawnym językiem. Szczegółowe uwagi redakcyjne przekazałem Autorowi rozprawy.

Uwagi krytyczne

1. Tytuł nie odzwierciedla treści rozprawy. Doktorant skoncentrował się na niepewności pomiarów profili chropowatości metodą stykową. Tytuł natomiast sugeruje analizę chropowatości powierzchni z zastosowaniem różnych technik pomiaru.
2. Tytuł rozdziału drugiego nie oddaje zawartości tego rozdziału. Aktualny stan wiedzy zaprezentowano również w rozdziale pierwszym.
3. Na stronie trzynastej stwierdzono, że stosowanie profilometru stykowego do pomiaru kieszeni smarowych jest możliwe, gdy stosunek głębokości otworu h do jego średnicy D jest większy od 0.5. Czy dotyczy to wszystkich średnic, czy tylko $D = 80 \mu\text{m}$? Zniekształcenie profilu końcówką stykową jest większe dla większych amplitud nierówności i mniejszych długości fali. W przypadku stałej długości fali charakteryzowanej średnicą otworu zniekształcenie powinno być większe dla większej głębokości otworu. Stwierdzenie zawarte w pracy praktyczne neguje możliwość stosowania profilometrów stykowych do pomiaru powierzchni teksturowanych, wartość stosunku h/D powinna być w zakresie 0.01-0.1. Korzystnie byłoby zamieścić na rysunku 1.3 profil przechodzący przez kieszeń smarową uzyskany z użyciem przyrządu optycznego. Powierzchnie teksturowane nie zawsze zawierają regularnie powtarzające się wgłębienia, ich układ może być losowy.
4. Czy rysunek 1.17 przedstawia uśrednione parametry chropowatości? Rozbieżności względne dotyczące parametru R_{sk} są spowodowane wartością tego parametru zbliżoną do 0. Dlatego często nie analizuje się zmian względnych współczynnika skośności, jedynie zmiany względne. Szkoda, że nie podano wartości promienia zaokrąglenia ostrza odwzorowującego przyrządu Talyrond 365.
5. W rozdziale 1.7 należałoby pokazać przykłady wzorców.
6. Strona 49 i strona 50, czy filtr λ_c zależy od promienia zaokrąglenia końcówki pomiarowej i kroku próbkowania?
7. Moim zdaniem należałoby napisać, na wartości jakich parametrów mają wpływ błędy pomiaru spowodowane zmianami odstępów próbkowania, błędów kwantyzacji, odrywania końcówki pomiarowej od powierzchni lub filtracji mechanicznej (strony 49-52).
8. Brak w pracy dyskusji wyników przedstawionych w tablicach 2.1-2.4.
9. Dlaczego w przypadku pomiarów z wykorzystaniem urządzenia Form Talysurf promień zaokrąglenia końcówki pomiarowej jest mniejszy od nominalnego?

10. Proszę przedstawić porównanie wymiarów rysy otrzymanych z zastosowaniem mikroskopu AFM i interferometru (rys.4.6). W pracy jest brak dyskusji wpływu prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego na zniekształcenie powierzchni (tablica 4.1).
11. W podrozdziale 4.1 należałoby przeanalizować wpływ zmiany kroku próbkowania na wartości parametrów, w szczególności RSm i Rdq. W szczególności należałoby przedyskutować różną wrażliwość parametru RSm na odstęp próbkowania dla profilu losowego i okresowego. Wpływ odstępu próbkowania na wartości parametrów stereometrii powierzchni jest istotny, gdyż jego zmniejszenie wydłuża czas pomiarów. Jeśli skoncentrowano się na parametrach profili, należałoby przeprowadzić analizę zmiany kroku próbkowania, promienia końcówki pomiarowej (zgodnie z normami) i filtra krótkofalowego. W podrozdziale tym brak jest porównań wyników badań z literaturą.
12. Wpływy prostoliniowości osi y, błędu pozycjonowania i powtarzalności pozycjonowania istotne są podczas pomiarów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D. Jaki wpływ mają te błędy na dokładność pomiaru profili nierówności w osi x?
13. W podrozdziale 4.6.1 brak dyskusji wyników pomiarów.
14. W podrozdziale 4.6.2 należałoby pokazać powierzchnie wzorców, a zwłaszcza typu D. Czy analizowana powierzchnia była losowa, czy okresowa? Pozwoliłoby to na lepszą dyskusję wyników.
15. Podrozdział dotyczący wpływu prędkości przesuwu końcówki pomiarowej na wyniki pomiarów jest interesujący. Jednak istnieją pewne wątpliwości. Jak aproksymowano wyniki pomiarów na rysunku 4.27? Dlaczego nie analizowano zmian parametru Rdq? Jak można wytłumaczyć powstawanie drgań przy wzroście prędkości pomiaru (rysunki 4.31 i 4.32)? Na podstawie badań przedstawionych na wzorcach porównawczych stwierdzono, że wzrost prędkości pomiaru wpływa znacznie na wzrost pochylenia powierzchni, co jest powiązane ze zmniejszeniem wartości parametru wzdłużnego. Na taki charakter zmian może mieć wpływ powstawanie drgań. Wyniki badań innych autorów świadczą o odwrotnym wpływie prędkości przesuwu na wyniki pomiaru parametrów (pochylenie zmniejsza się, wartość parametru RSm rośnie). Na rysunkach porównawczych 4.28 i 4.37 przy prędkości pomiaru 2 mm/s profil nierówności powierzchni leżał często poniżej profilu otrzymanego przy najmniejszej prędkości, uważanego za profil wzorcowy. Jak to można wytłumaczyć? Ważny jest również wzrost szumu pomiarowego ze wzrostem prędkości pomiaru (rysunki 4.43 i 4.44). Możliwe, że wpływ wzrostu prędkości końcówki pomiarowej na wyniki pomiaru zależy nie tylko od odrywania końcówki od powierzchni mierzonej. Wynika z tego, że istotna jest konstrukcja układu pomiarowego profilometru stykowego. Dlatego celowa jest dyskusja wyników. Niezależnie od charakteru zmian, parametr Rdq jest podatny na odrywanie się ostrza odwzorowującego od powierzchni.
16. Korzystnie byłoby podać również wartości parametru RSm przy pomiarze wzorca AFL (rysunek 4.45). Dlaczego przyrzędy Form Talysurf cechowały się najmniejszymi wartościami szumu? Proszę wyjaśnić rysunek 4.47.
17. Czy wpływ zmian temperatury jest istotny w przypadku pomiaru profilu, który trwa krótko? Taki pomiar jest mniej wrażliwy na błędy w porównaniu do pomiaru stereometrii powierzchni i wyodrębnianiu profilu. Proszę przeanalizować rysunek 4.48. Interesujący jest brak przesunięcia fazowego między wartościami temperatury i wysokością profilu – dotyczy to maksimów wykresu.
18. W celu badania wpływu rodzaju powierzchni na zmienność wartości parametrów chropowatości przeprowadzono po 5 pomiarów w dwunastu obszarach. Proszę o szczegóły, czy chodzi o pomiary profili, jakie jest pole obszaru, czy analizowane profile nie były skorelowane itp. Proszę również skomentować rysunek 4.52. W tablicy 4.12 dobrze byłoby zamieścić wartości współczynnika zmienności. Uważam, że analiza jedynie dwóch powierzchni nie zapewnia wiarygodnych wniosków. W niektórych przypadkach zaobserwowano znaczną zmienność parametrów Rsk i Rku lub niewielką zmienność

pochylenia. Nie odniesiono się do podobnych badań, których wyniki podano w literaturze. Proszę skomentować różnice otrzymane dla powierzchni szlifowanej i struganej.

19. Tablica 4.13 - dlaczego największe rozbieżności występują dla parametrów uśrednionych R_a i R_q , a najmniejsze dla parametru horyzontalnego R_{Sm} ? Ciekawą informację można by uzyskać podczas analizy profili powierzchni obrobionych. Wtedy istnieje duże prawdopodobieństwo rozbieżności parametrów R_{Sm} , R_c i R_z .
20. Nie jest jasne, czy koncepcja badań porównawczych dotyczy profili nierówności, czy stereometrii powierzchni.
21. Doktorant uważa, że należy wybrać do badań porównawczych próbki po różnych obróbkach o odmiennych właściwościach funkcjonalnych cechujące się różnymi wartościami parametrów chropowatości. Wybrał powierzchnię honowaną, dwie powierzchnie śrutowane oraz powierzchnię po obróbce elektroerozyjnej. Jednak dwie z analizowanych powierzchni cechują się tą samą wartością parametru R_a . Trzy powierzchnie są prawdopodobnie izotropowe, zaś jedna (honowana) jest anizotropowa. Proponowałbym inny dobór tych powierzchni o różnych wartościach parametrów amplitudowych i wzdłużnych. Powierzchnie powinny być izotropowe i anizotropowe, okresowe i losowe, jedno- i dwuprocesowe o różnych wysokościach nierówności. Istotne byłoby zastosowanie powierzchni dwuprocesowych, są one bowiem bardzo podatne na błędy (możliwe, że powierzchnia honowana jest powierzchnią dwuprocesową). Dobór takich powierzchni zależy od tego, czy przeprowadzamy badania porównawcze profili, czy stereometrii powierzchni. Ocena właściwości funkcjonalnych powierzchni jest trudna, gdyż zależą one od warunków pracy.
22. Sposób oznaczania miejsca pomiaru przedstawiony na rysunku 5.2 jest moim zdaniem niewystarczający. Jest to tak zwana relokacja mechaniczna. Po jej przeprowadzeniu obszary pomiarowe będą się jednak różnić. Następnie należy przeprowadzić relokację cyfrową poprzez obracanie i przesuwanie mierzonych powierzchni. Sytuację może ułatwić oprogramowanie, które dopasowuje do siebie powierzchnie na przykład w opcji „odejmowanie powierzchni”. Sytuacja jest łatwiejsza przy dopasowywaniu do siebie dwóch powierzchni. Poza tym, należy zachować taką samą procedurę analiz, na przykład stosowanie tego samego stopnia wielomianu do usuwania krzywizny.
23. Przyjmuję, że algorytm wyznaczania parametrów dotyczy zarówno stereometrii powierzchni, jak i profili nierówności. Dlaczego parametry stereometrii powierzchni zostały ograniczone do parametrów pionowych? Opinia, że są one wystarczające do charakteryzowania topografii powierzchni jest nieuzasadniona. Jaki powinien być odstęp próbkowania? Przy wyodrębnianiu serii profili istotne jest, aby były nieskorelowane i najlepiej oddalone o długość korelacji. Ta seria powinna być wyodrębniona z powierzchni niefiltrowanej. Jak to rozumieć? Po usunięciu krzywizny, czy po zastosowaniu filtra S i usunięciu krzywizny? Parametry profilu pierwotnego powinny być otrzymane po zastosowaniu filtra krótkofalowego. Filtracja profilu jest nieco inna od filtracji powierzchni. Dlatego korzystne byłoby najpierw usunięcie krzywizny, potem wyodrębnienie profilu i wtedy zastosowanie filtra krótkofalowego. Oczywiście krok próbkowania powinien być zgodny z normą i powiązany z graniczną długością fali filtra λ_s . Należałoby również zastosować jednakową prędkość przesuwu końcówki pomiarowej. Chciałbym jeszcze raz zauważyć, że w celu analizy tylko parametrów profili chropowatości korzystny jest tylko pomiar kilku lub kilkunastu profili. Odpadają również błędy związane ze zmianami temperatury, można zastosować bardzo mały odstęp próbkowania i filtr bez zarządzania efektami końcowymi (filtr regresji). Stosowanie filtra regresji powoduje również błędy wyznaczania parametrów. Dlaczego parametry profilu pokazane na rysunku 5.4 są tylko parametrami pionowymi?
24. Proszę przedyskutować przyczyny otrzymania różnych wartości niepewności rozszerzonej wyznaczenia parametru R_z – rysunek 5.6?
25. Dlaczego nie zastosowano metody Monte Carlo do wyznaczania niepewności wyznaczania parametrów P_{Sm} i P_z ? Proszę przeanalizować wyniki przedstawione w tablicy 5.3 oraz na rysunku 5.11. Czym są spowodowane różnice?

Wniosek końcowy

Większość z przedstawionych w niniejszej recenzji uwag ma charakter dyskusyjny i nie wpływa na pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy doktorskiej, która jest aktualnym i interesującym opracowaniem Doktoranta, dotyczącym niepewności pomiarów profili chropowatości powierzchni. Podjęty problem jest istotny, wcześniejsze porównania wyników pomiarów stykowych chropowatości powierzchni wykazały bowiem znaczne rozbieżności. Wyznaczenie niepewności pomiarów chropowatości powierzchni jest trudne. Przedstawiony materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta, zarówno pod względem poznawczym jak i użytkowym, który wpisuje się w zakres dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Mgr inż. Jacek Świdorski jest uznanym w kraju specjalistą w dziedzinie metrologii technicznej w szczególności metrologii powierzchni. Przedstawione w pracy badania i informacje wskazują, że Doktorant dobrze orientuje się w literaturze przedmiotu oraz posiada wiedzę teoretyczną w obszarze tematyki pracy. Zakres badań jest obszerny i uzasadniony, który może być kontynuowany w przyszłości. Szczególnie pozytywnie oceniam badania w zakresie wpływu prędkości pomiaru końcówki pomiarowej oraz szumu na wyniki pomiarów. Pozytywnie oceniam wnioski końcowe oraz kierunki dalszych badań.

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Jacka Świdorskiego pt. **„Opracowanie koncepcji badań porównawczych przyrządów do oceny chropowatości powierzchni w aspekcie niepewności pomiaru”** spełnia wymagania *ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i może być dopuszczona do publicznej obrony.

