

Prof. dr hab. inż. Paweł Pawlus  
Politechnika Rzeszowska  
Katedra Technologii maszyn i Inżynierii Produkcji  
35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12

Rzeszów, 13 września 2018 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana magistra inżyniera **Karola Grochalskiego** pt.

### **„Kompensacja wpływu warunków termicznych na profilometryczne pomiary nierówności powierzchni”**

*Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej.*

#### **Istotność problemu badawczego**

Analiza struktury geometrycznej powierzchni (SGP) jest często stosowana. Jedną z przyczyn pomiaru SGP jest kontrola procesu wytwarzania. Drugą, bardziej istotną – zrozumienie i przewidywanie właściwości funkcjonalnych powierzchni. Powierzchnia ma bowiem decydujący wpływ na zagadnienia kontaktu (jak również przyczepności, sztywności, przewodnictwa), jest również istotna z punktu widzenia tarcia, smarowania, zużycia i zmęczenia. Wpływ SGP na zagadnienia tribologiczne jest istotny przede wszystkim z punktu widzenia ograniczenia strat mechanicznych, co jest powiązane ze zmniejszeniem kosztów. Analiza SGP zdobywa coraz większą popularność również w dziedzinach nie związanych z tradycyjnymi doświadczeniami inżynierskimi, jak nauki medyczne, sport, biologia i inne. Stereometryczna analiza powierzchni umożliwia stosowanie metod matematycznych stosowanych w oceanografii, geomorfologii, geologii, kartografii.

Istnieje wiele metod pomiaru SGP. Metody stykowe, w których pomiar polega na przemieszczaniu się diamentowej końcówki pomiarowej po badanej powierzchni, są najczęściej i najdłużej stosowane w badaniach SGP. Profilometry stykowe cechuje łatwość użycia, odporność na warunki przemysłowe, możliwość pomiaru wybranego fragmentu powierzchni, dogodny wyprowadzenie danych, niewielka wrażliwość na drgania i zanieczyszczenia powierzchni. Pomiar chropowatości za pomocą przyrządów stykowych jest stosunkowo dobrze poznany i opisany, również w normach. Dlatego metody te są uważane za wiarygodne. Wadą metod stykowych w odniesieniu do pomiarów stereometrycznych jest długi czas pomiarów. Metody te są jednak wrażliwe na czynniki zakłócające, takie jak oddziaływania termiczne. Dotychczas nie zaprezentowano w literaturze technicznej kompleksowych badań

określających wpływ zmian temperatury na właściwości metrologiczne w pomiarach SGP metodą stykową. Dlatego temat rozprawy doktorskiej uważam za aktualny. Pracę można uznać za nowatorską. Zrozumienie wpływu zjawisk termicznych na wyniki pomiarów z wykorzystaniem profilometrów stykowych wraz z opracowaniem procedury kompensacji błędów przyczyni się do poprawy dokładności pomiarów SGP.

### Przedmiot recenzji

Praca składa się z trzynastu rozdziałów. Na początku zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń. Rozdział pierwszy stanowi dwustronicowe wprowadzenie. Rozdziały drugi i trzeci dotyczą analizy literatury. W rozdziale drugim przedstawiono metody pomiaru nierówności powierzchni, zaś w rozdziale trzecim metody pomiaru temperatury. Rozdział czwarty, jednostronicowy to wnioski z analizy literatury. W rozdziale piątym przedstawiono cel i tezę pracy. Rozdział szósty obejmuje cel i program badań. Kolejne rozdziały dotyczą badań własnych. Rozdział siódmy przedstawia rezultaty badań wpływu wewnętrznych źródeł ciepła na wyniki pomiarów profilometrycznych. W rozdziale ósmym opisano konstrukcję komory termicznej. Rozdział dziewiąty przedstawia wyniki badań wpływu zewnętrznych źródeł ciepła na wyniki pomiarów profilometrycznych. W rozdziale dziesiątym omówiono algorytm korekcji wpływu warunków termicznych na wyniki pomiarów profilometrycznych. Krótki rozdział jedenasty obejmuje sprawdzenie aparatury badawczej. Podsumowanie i wnioski zamieszczono w rozdziale dwunastym. W rozdziale trzynastym zaprezentowano plan dalszych badań. Praca liczy 182 strony. Spis literatury obejmuje 127 pozycji. Praca zawiera również spis norm i streszczenia w języku angielskim i polskim. W załączniku przedstawiono wyniki działania algorytmu korekcyjnego.

Uważam, że układ pracy jest logiczny, wynika z analizy literatury oraz przeprowadzonych badań doświadczalnych. Rozdziały pracy powiązane są ze sobą merytorycznie i tworzą spójną, zwartą całość, chociaż w dalszej części recenzji proponuję pewne zmiany.

### Ocena rozprawy

Uwagi do pracy przedstawię przy omawianiu jej rozdziałów.

Wprowadzenie (**rozdział pierwszy**) zawiera motywy podjęcia tematu oraz krótki zakres pracy.

W **rozdziale drugim** omówiono pomiary nierówności powierzchni. Rysunek 2.1 na stronie ósmej przedstawia podział przyrządów do pomiarów SGP. Kontrowersyjny jest podział przyrządów stykowych (na indukcyjne, piezoelektryczne, fotooptyczne i interferencyjne) ze względu na rodzaj przetworników zwłaszcza, że ten podział omówiono dopiero na stronie jedenastej. Podział ten jest odmienny od podziału innych metod, które również używają przetworników. Proponowałbym inny rodzaj podziału, na przykład z dużą i małą pętlą pomiarową. Autor wyróżnia niefortunnie „metody zogniskowaną wiązką światła”.

Moim zdaniem błędy występujące w pomiarach stykowych powinny zajmować znaczną część analizy literatury, a nie tylko trzy strony. Nie omówiono dokładnie błędów wynikających z kształtu i wielkości końcówki pomiarowej. Pominięto zagadnienie oderwania się końcówki pomiarowej od powierzchni mierzonej. Błędy wynikające z wpływu warunków termicznych zajmują tylko pół strony z powołaniem tylko na pozycję [70], której współautorem jest promotor przewodu doktorskiego. Brak dotychczasowej analizy tego rodzaju błędów wymaga komentarza zwłaszcza, że pomiary stykowe są znane od wielu lat.

Na stronie 12 zamieszczono źródła błędów niezależnych od zastosowanego przetwornika i sondy pomiarowej. Czy błędy wynikające z niedoskonałości końcówki pomiarowej są niezależne od sondy pomiarowej?

Moim zdaniem, w rozdziale drugim poświęcono zbyt mało uwagi pomiarom stykowym. Część własna pracy dotyczy bowiem tylko tej metody pomiaru SGP, pozostałe metody powinny być tylko skrótowo omówione. Większość rysunków w rozdziale drugim pochodzi z dobrze dostępnej pracy [118].

Strona 10, wzór 2.1.1, powinno być „liczby Poissona”.

Strona 12, błąd siódmy, powinno być „luzy”.

Strona 16, wiersz dziewiąty, powinno być: „Michelsona”.

Strona 17, wiersz trzeci od dołu, powinno być „interferometrię”.

Strona 17, Autor napisał, że interferometria przesunięcia fazowego powinna być stosowana do powierzchni o chropowatości mniejszej niż 30 nm. Jest to skrót myślowy, powinno być: o wysokości chropowatości.

Strona 19, wiersz 16, powinno być „tunelowania”.

**W rozdziale trzecim** przedstawiono metody pomiaru temperatury.

Strona 32, trzy wiersze nad rysunkiem 3.11, powinno być „współczynnikiem”

Podpis pod rysunkiem 3.11, powinno być „stosowanych”.

Strona 39, dobrze byłoby podać definicję egzytancji.

Strona 40, współczynnik odbicia wyrażono zależnością (3.6.4).

Należy zastosować jednakowe nazewnictwo, e – wzór (3.6.1) albo exp - wzór (3.6.15).

W objaśnieniu do wzoru (3.6.15) jest, że c to prędkość światła w próżni. Ale c nie występuje w tym wzorze.

Strona 42, wiersz drugi od dołu, powinno być „zdefiniowana”.

Strona 43, wiersz 4, powinno być „uwzględnienie”.

We wzorze (3.6.1.2) różnie oznaczono kąt.

**W rozdziale czwartym** zaprezentowano wnioski z analizy literatury. Na końcu pierwszego wniosku zamieszczono informację o wpływie prędkości przemieszczania się sondy po powierzchni. Wpływ ten nie był dokładnie omówiony w rozdziale drugim. We wnioskach nie odniesiono się do rozdziału trzeciego oraz metod innych niż stykowe. Moim zdaniem wniosek drugi powinien zostać zaprezentowany na końcu.

Nie mam uwag krytycznych dotyczących tezy pracy (**rozdział piąty**). Cel pracy obejmuje opracowanie kompensacji wpływu zmian temperatury (na co?).

Nieco lepiej przedstawiono cel pracy w **rozdziale szóstym**. Sformułowano w nim dodatkowo cel badań, którym było określenie wpływu wysokości, na której przeprowadzono pomiar topografii powierzchni, podczas oddziaływania cieplnego (na co?). Moim zdaniem korzystniej byłoby przedstawić cel pracy tylko raz.

Tytuł **rozdziału siódmego** sugeruje, że analizowano poprawność przestrzennych pomiarów profilometrycznych. Jednakże takie badania przeprowadzono tylko w ramach pomiarów dynamicznych zaprezentowanych w podrozdziale 7.4. W trakcie pomiarów statycznych przeprowadzono badania wpływu wewnętrznych źródeł ciepła na wydłużenia w osiach x, y, z w odniesieniu do trzech profilometrów stykowych. Dlaczego dobrano takie profilometry? Czy kierowano się jedynie ich dostępnością? Tytuł sugeruje, że badano poprawność przestrzennych pomiarów profilometrycznych, których jednak nie analizowano w rozdziale siódmym.

Dlaczego temperatura otoczenia podczas badań profilometru Hommel wzrastała (rysunek 7.9 i inne)? Czy ma wpływ to na wyniki badań? Temperatura otoczenia również rosła podczas badań profilometru TOPO (rysunek 7.21 i następne).

Podczas analizy rysunku 7.22 Autor zauważył, że stabilizacja napędu w osi x i przemieszczenia głowicy w kierunku osi x nastąpiła po upływie ośmiu godzin. Wydaje się, że wydłużenie nadal rosło po ośmiu godzinach. Kolejny rysunek nie pokazuje powtarzalności pomiarów, jak sugeruje Autor.

W odniesieniu do rysunku 7.24 Autor uważa, że stabilizacja przemieszczenia głowicy pomiarowej w kierunku osi x nastąpiła po jedenastu godzinach. Informacja ta nie jest wiarygodna, ponieważ łączny czas badań wynosił 12 godzin.

Podrozdział 7.2 jest bardzo ciekawy, sugerowałbym dodatkowo opracowanie wytycznych dla eksploatatorów odnośnie wyboru profilometru zapewniającego najmniejszą podatność na wpływ wewnętrznych źródeł ciepła.

Podczas pomiarów dynamicznych określono wpływ wewnętrznych źródeł ciepła na wierność odwzorowania powierzchni. Mierzonym elementem była płytka płasko-równoległa. Mierzono 600 razy ten sam profil i z uzyskanych profili wygenerowano powierzchnię. Badania przeprowadzono z użyciem profilometru charakteryzującego się największą podatnością na wpływ zewnętrznych źródeł ciepła.

Rysunek 7.46 i następne: sugerowałbym opisanie osi poziomej, na przykład liczbą profili. Kierunek pomiaru jest niezbyt jasno opisany. Na rysunkach 7.47, 7.48 i innych pokazano poprzeczne profile chropowatości i falistości. Jaki zastosowano filtr i jego graniczną długość fali? Uważam, że po przeanalizowaniu tych rysunków w dalszych częściach badań przedmiotem analizy powinny być tylko profile falistości. Sugerowałbym również analizę określającą wpływ wydłużenia w osi x na poprawność pomiarów – wydłużenie w osi x było bowiem większe, niż w osi z.

Strona 58, rysunek 7.8 – powinno być: "badanie".

Strona 60, rysunek 7.10, chyba powinno być: „ $\Delta y$  różne od 0”.

Strona 82, wiersz czwarty od dołu: powinno być: "o powtarzalności nagrzewania".

Strona 85, wiersz trzeci od dołu, czy punkt styku może być niewielki?

Strona 88, wiersz drugi, powinno być: „co warunkowało„.

Strona 94, wiersz piąty, powinno być „wygenerowana”.

W **rozdziale ósmym** przedstawiono konstrukcję komory termicznej zastosowanej w celu wyznaczenia odkształcalności cieplnej profilometru w funkcji zmian temperatury.

Strona 106, linia dziewiąta od dołu; powinno być: „czujniku wilgotności”.

Strona 107, zaczynające się od „Układ sterowania” wymaga poprawy.

Strona 107, ostatnia linijka; powinno być: "była jak najmniejsza."

Strony 108 i 109, strzałki różnych kolorów zamieszczone są na rysunku 8.4, a nie 8.5.

Strona 116, zdanie ostatnie, powinno być: „komorę termiczną”.

W **rozdziale dziewiątym** przeanalizowano wpływ zewnętrznych zmian temperatury na poprawność pomiarów profilometrycznych. Zastosowano pomiar dynamiczny, podobnie jak w rozdziale siódmym. W podrozdziale 9.1 przedstawiono metodykę badań. Nadal, podobnie jak w rozdziale siódmym zaprezentowano początkowo profile chropowatości i falistości wygenerowanej powierzchni, chociaż można było ograniczyć się do profilu falistości. Dopiero od rysunku 9.6 ograniczono się do przedstawienia tylko profili falistości profili poprzecznych. W podrozdziale 9.2 przedstawiono wyniki badań płytki płasko-równoległej przy różnych zmianach temperatury otoczenia. Są one interesujące. Stwierdzono korelację poprzecznego profilu falistości ze zmianą temperatury wewnątrz komory termicznej. Szczególnie interesujący jest wpływ bezwładności cieplnej na przesunięcie profilu falistości powierzchni wygenerowanej względem zmian przebiegu temperatury otoczenia. Autor analizował przesunięcie punktu przegięcia uzyskanego profilu falistości względem ekstremów lokalnych krzywych przebiegu temperatury. Sugerowałbym analizę przesunięcia lokalnych ekstremów dwóch krzywych (znalezienie ekstremum jest łatwiejsze od znalezienia punktu przegięcia). Zastosowano analizę harmoniczną do analizy zależności pomiędzy zmianami temperatury a odwzorowaniem nierówności powierzchni. Do oceny przesunięcia między

profilem poprzecznym falistości oraz przebiegu temperatury można byłoby zastosować funkcję korelacji krzyżowej, używaną często w metrologii powierzchni, najlepiej po odwróceniu jednego z analizowanych profili względem osi pionowej.

Rozwiązanie mające na celu ograniczenie wpływu zmian temperatury na wyniki pomiarów profilometrycznych powierzchni zaproponowano w **rozdziale dziesiątym**. Algorytm wyznacza rozszerzalność cieplną elementów profilometru oraz stosuje korekcję uwzględniając wysokość, na której dokonano pomiaru oraz przesunięcie fazowe między przebiegiem temperatury a odpowiedzią profilometru, wynikające z inercji układu pomiarowego. Niestety, przesunięcie fazowe jest indywidualne dla danego urządzenia i musi być wyznaczone empirycznie. Ogranicza to częściowo możliwość zastosowania algorytmu. Interesująca byłaby analiza, jaki wpływ ma brak uwzględnienia przesunięcia fazowego na wyniki korekcji. Algorytm ten dotyczył tylko korekcji pomiarów w osi pionowej, co jest jego ograniczeniem. Należy podać informacje o ciepłe właściwym i pojemności cieplnej próbki. W podrozdziale 10.2 opisano wpływ wysokości pomiarowej na rozszerzalność termiczną kolumny profilometru. Tytuł sugeruje, że uwzględniono również rodzaj badanego materiału, co jednak nie miało miejsca. Moim zdaniem podrozdział ten powinien być zamieszczony w rozdziale siódmym. Dalsza część pracy (podrozdział 10.4) przedstawia wyniki działania programu korekcyjnego. Na rysunku 10.1 podano, że suma wartości parametrów  $S_p$  i  $S_v$  nie jest równa wartości parametru  $S_z$ , co wynika prawdopodobnie z błędów zaokrąglenia. Wyniki przedstawione w tym podrozdziale są istotne, jednak mogłyby być przedstawione inaczej. Autor często zauważa, że największe różnice bezwzględne dotyczą parametrów  $S_z$ ,  $S_p$  i  $S_v$  lub  $P_p$ ,  $P_z$  i  $P_v$ . Wynika to z tego, że parametry te opisują cechy ekstremalne powierzchni w odróżnieniu od parametrów  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $P_a$  i  $P_q$ . Wynika to z definicji parametrów. Bardziej interesująca byłaby analiza błędów względnych. Autor użył w tej części pracy tych samych zdań, zmieniając tylko ich fragmenty (kopiuj i wklej), na przykład na stronach 152 i 158. Używanie tych samych sformułowań, stosowane często przez studentów, nie powinno występować w rozprawie doktorskiej. Te same informacje są prezentowane dwukrotnie, na przykład na rysunku 10.15 i w tabeli 10.2. Korzystniej byłoby przedstawić wyniki graficznie, z podaniem wartości parametrów, jak na rysunku 10.11. Rozdział ten nie zawiera praktycznie dyskusji, dlaczego wartości niektórych parametrów zmieniają się bardziej lub mniej.

Strona 146, wiersz 7, co Autor rozumie przez „rzęd filtra”?

**Rozdział jedenasty** dotyczy sprawdzania aparatury badawczej. Ponieważ nie wnosi on nic nowego do pracy, powinien być zaprezentowany w załączniku. W pracy nie zamieszczono informacji o powtarzalności wyników pomiarów.

W **rozdziale dwunastym** zaprezentowano 10 wniosków końcowych. Stwierdzono również, że teza pracy została udowodniona, a cel zrealizowany. Uważam, że wniosek pierwszy powinien być sformułowany w ten sposób, że metodyka umożliwia wyznaczenie parametrów korekcyjnych, jakie należy zaimplementować w algorytmie kompensującym wpływ temperatury na wyniki pomiarów profilometrycznych.

Interesujący jest jednostronicowy **rozdział trzynasty** zawierający plan dalszych badań. Można do nich zaliczyć dodatkowo wpływ rodzaju powierzchni na błędy spowodowane istnieniem oddziaływań termicznych oraz propozycję wyboru rodzaju profilometru zapewniającego najmniejsze błędy. Interesujące byłoby również badanie wpływu oddziaływań termicznych na parametry przestrzenne inne od pionowych.

Rozprawa napisana jest poprawnym językiem. Czyta się ją dość łatwo, choć zdarzają się powtórzenia i niezręczności językowe. Jest bardzo starannie opracowana, zawiera jednak błędy redakcyjne. Niektóre uwagi zmieściłem przy omawianiu rozdziałów rozprawy.

## Podsumowanie

Należy stwierdzić, że Autor rozprawy przeanalizował wnikliwie pozycje literatury dotyczące tematu pracy. Na tej podstawie sformułowano hipotezę badawczą. Należy podkreślić, że temat pracy jest oryginalny i rozwiązanie postawionego problemu nie zostało dotychczas przedstawione w sposób zadowalający. Niewiele zamieszczono w literaturze technicznej pozycji dotyczących wpływu wewnętrznych i zewnętrznych źródeł ciepła na poprawność pomiarów profilometrycznych, Diagnostykę termiczną stosuje się obecnie jedynie dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Istotnym osiągnięciem Autora jest opracowanie procedury kompensacji wpływu warunków termicznych na wyniki profilometrycznych pomiarów nierówności powierzchni. Wyniki badań są bardzo istotne, bowiem pomiary stereometrii powierzchni metodą stykową uznawane za pomiary referencyjne trwają zazwyczaj długo. Dlatego wyniki stosowania pracy poprzez zwiększenie wiarygodności pomiarów struktury geometrycznej powierzchni mogą przyczynić się do poprawy kontroli jakości wyrobów.

Rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Widać, że Doktorant dobrze porusza się w trudnych tematycznie zagadnieniach. Recenzowana praca dotychczas ważnego problemu naukowego. Teza pracy została udowodniona, a jej cel osiągnięty. Umiejętność posługiwania się warsztatem naukowo-badawczym oceniam bardzo wysoko. Przedstawione uwagi krytyczne, wątpliwości i sugestie nie podważają jakości merytorycznej rozprawy i jej wartości naukowych. Mają one charakter dyskusyjny i porządkowy, wskazują głównie na potrzebę lepszej prezentacji wyników badań.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana magistra inżyniera Karola Grochalskiego pt. „Kompensacja wpływu warunków termicznych na profilometryczne pomiary nierówności powierzchni” stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie trudnego problemu naukowego. Autor wykazał się dobrą znajomością wiedzy z zakresu tematyki pracy oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozprawa spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim i może być dopuszczona do obrony.

Z uwagi na walory naukowe i praktyczne uważam recenzowaną pracę doktorską za wyróżniającą.

Pawel Rowler