
dr hab. inż. Bartosz GAPIŃSKI, prof. PP
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
e-mail: bartosz.gapinski@put.poznan.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Tomasza DOBROWOLSKIEGO pt.**

***ANALIZA METROLOGICZNA WZORCÓW STOSOWANYCH DO
POMIARÓW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI***

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof STĘPIEŃ, prof. PŚk

Podstawa opracowania recenzji:

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej
nr. MAA-510/69/2023.

1. Wprowadzenie

Poznanie otaczającego nas świata wiąże się nierozdzielnie z jego opisem umożliwiającym prezentację naszych spostrzeżeń szerszemu gronu odbiorców. Opis ten może być jakościowy, bądź ilościowy. W przypadku tego pierwszego wystarczające są stwierdzenia takie jak „ładny”, bądź „brzydki”. Ocena taka jest subiektywna i może, ale nie musi spotkać się ze zrozumieniem i akceptacją innych obserwujących daną rzecz, bądź zjawisko. Natomiast opis ilościowy oparty jest o pewne wymierne wartości liczbowe odpowiadające parametrom adekwatnym do opisywanego zjawiska. By ten opis był jednoznaczny konieczne jest zdefiniowanie tych zjawisk i opracowanie wzorców pozwalających stwierdzić, czy i ile razy dana wielkość jest większa lub mniejsza od danych referencyjnych. Wzorce te muszą być adekwatne do opisywanego zjawiska i zachowywać jednoznaczność definiowanych wartości, a jednocześnie zapewniać łatwość ich stosowania dla odbiorców.

Opisując otaczająca nas rzeczywistość, należy pamiętać, że każde ciało stałe we wszechświecie ograniczone jest powierzchniami. Stanowią one granicę pomiędzy tym obiektem, a

jego otoczeniem. Powierzchnie te mogą mieć postać naturalną, bądź być efektem działalności ludzkiej. Determinują one przeznaczenie wybranego obiektu, bądź są efektem otaczających je zjawisk. W przypadku obiektów mających określone przeznaczenie techniczne postać powierzchni jest jednym z kluczowych parametrów. Oprócz kształtu geometrycznego (płaska, wypukła, wklęsła itp.) może być gładka lub szorstka, refleksyjna bądź matowa, losowa lub periodyczna. Ponadto opis geometryczny powierzchni zależy od skali w jakiej jest ona weryfikowana. Nieustanny rozwój technologiczny powoduje, że oprócz standardowo używanej w opisie geometrii powierzchni skali mikrometrycznej, coraz częściej konieczne jest sięganie po skalę nanometryczną, co pozwala np. pełniej zrozumieć zjawiska tribologiczne, czy zachodzące podczas procesów łączenia.

Równoległe z tymi wymaganiami rozwijane są stykowe i bezstykowe metody pomiarowe pozwalające na digitalizację badanej powierzchni. Dla potwierdzenia poprawności działania urządzeń wyposażonych w różnego typu sensory konieczne jest stosowanie wzorców zapewniających ocenę wierności odtworzenia poszczególnych parametrów powierzchni odpowiadających m.in. zakresowi pomiarowemu, rozdzielczości w osi pionowej i osiach poziomych, zdolności rejestracji stromych zboczy itp.

Między innymi z tych powodów podjęta przez Pana mgr. inż. Tomasza DOBROWOLSKIEGO tematyka, związana z analizą metrologiczną wzorców stosowanych do pomiarów chropowatości powierzchni jest aktualna i jednocześnie pokazuje, że ciągle pozostaje w tym zakresie szerokie pole do dalszych prac zarówno pod względem naukowym, jak i użytkowym. Uzyskane efekty rozprawy doktorskiej mogą z powodzeniem być rozpowszechniane i wdrażane zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce przemysłowej, w której świadomość znaczenia poprawnej metrologicznie realizacji pomiarów chropowatości i topografii powierzchni bywa niewystarczająca.

2. Układ i obszar merytoryczny rozprawy

Recenzowana praca liczy 130 strony i składa się z 6 rozdziałów. Ponadto zawiera nienumerowany wykaz literatury obejmujący publikacje, normy, dokumenty instytucji akredytujących oraz strony internetowe, spis rysunków i tablic oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca poprzedzona jest spisem treści i wykazem ważniejszych skrótów oraz oznaczeń. Właściwa część rozprawy zawiera następujące elementy:

Rozdział 1 – *Wprowadzenie* – Autor rozpoczyna od wprowadzenia w tematykę rozprawy doktorskiej. Następnie przedstawia historię jednostek długości oraz ewolucję definicji metra. Kolejną część obejmuje wykaz metod pomiaru chropowatości i topografii powierzchni oraz zasady zachowania spójności pomiarowej w kontekście tematyki rozprawy. Następnie Doktorant omówił ideę parametrycznej oceny struktury geometrycznej powierzchni oraz wybrane wzorce ze szczególnym naciskiem na wzorce chropowatości i topografii powierzchni.

Rozdział 2 – *Aktualny stan wiedzy* – mgr inż. Tomasz DOBROWOLSKI przedstawił podstawowe charakterystyki metrologiczne przyrządów pomiarowych stosowanych w ocenie SGP. Następnie szeroko omówił wzorce materialne stosowane do oceny chropowatości i

topografii powierzchni oraz zasady wzorcowania używanych w tym obszarze przyrządów pomiarowych.

Rozdział 3 – *Cel i sposób realizacji pracy* – zgodnie z tytułem Doktorant zaprezentował cel pracy wraz z informacją o potrzebie opracowania nowego wzorca do wzorcowania przyrządów stykowych stosowanych w pomiarach topografii powierzchni oraz opisał sposób realizacji ww. zadania.

Rozdział 4 – *Badania wybranych typów wzorców* – w rozdziale tym Doktorant przedstawił wyniki pomiarów różnych wzorców uzyskanych za pomocą profilometru stykowego, wyniki pomiaru wzorca typu C z zastosowaniem różnych urządzeń pomiarowych oraz wyniki pomiarów wzorców stosowanych do wzorcowania urządzeń działających w oparciu o metody polowe.

Rozdział 5 – *Koncepcja wzorca* – zawiera opis podjętych przez Pana mgr. inż. Tomasza DOBROWOLSKIEGO prac związanych z opracowaniem wzorca przeznaczonego do badania profilometrów stykowych umożliwiających badanie topografii powierzchni z uwzględnieniem odpowiednio dużego zakresu pomiarowego w osi pionowej.

Rozdział 6 – *Podsumowanie i wnioski końcowe* – jak wskazuje tytuł rozdziału zawiera on wnioski, które autor podzielił na wnioski ogólne, grupę odnoszącą się do celów pracy oraz kierunki dalszych możliwych do podjęcia prac badawczych.

Wykaz literatury rysunków i tablic – obejmujący 42 publikacje, 34 normy, 5 dokumentów instytucji akredytujących – *International Laboratory Accreditation Cooperation, Polskie Centrum Akredytacji, European co-operation for Accreditation*, 2 dokumenty pochodzące z *Joint Committee for Guides in Metrology* oraz wykaz 10 stron internetowych. Spis rysunków zawiera 79 pozycji, a spis tablic 61, zawartych w ocenianej dysertacja.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Poddana ocenie rozprawa doktorska jest interesującym opracowaniem zawierającym szereg informacji na temat wzorców służących do weryfikacji urządzeń stosowanych do pomiaru chropowatości i topografii powierzchni oraz sposobów ich wzorcowania. Oprócz charakterystyki stosowanych obecnie wzorców, ich porównania i prezentacji wyników ich badań, Doktorant zaprezentował autorską konstrukcję wzorca. Tego typu rozwiązanie wypełnia pewną lukę rynkową, gdyż trudno jest znaleźć obiekt wzorcowy dedykowany pomiarom nierówności powierzchni oferujący relatywnie duży obszar pomiarowy zarówno w zakresie poziomym, jak i pionowym.

Przedstawiona treść dysertacji pozwala pozytywnie ocenić wiedzę i doświadczenie Autora utwierdzając czytającego w przekonaniu, iż posiada On odpowiednie kompetencje do realizacji podjętego tematu. Pozwoliło to Doktorantowi na sformułowanie końcowego wniosku o poprawności zrealizowanych prac i słuszności założeń podjętych przy opracowywaniu wzorca. Autor dokonał krytycznej dyskusji osiągniętych rezultatów, co świadczy to o Jego dojrzałości naukowej i należy oceniać pozytywnie. Analizując założenia ocenianej rozprawy doktorskiej, wyrażone w postaci celu naukowego można stwierdzić, iż zostały one przez Doktoranta zrealizowane. Przeprowadzono analizę metrologiczną wybranych wzorców chropowatości (2D) i topografii powierzchni (3D), a także porównano wyniki pomiarów wzorca C uzyskane dla metod

stykowych i optycznych. Ponadto Autor opracował i poddał badaniom autorski wzorzec dedykowany do weryfikacji poprawności pracy profilometrów stykowych.

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej Pan mgr. inż. Tomasz DOBROWOLSKI przedstawił przegląd literatury oraz szeroki wachlarz norm i wytycznych przywołując je we właściwych miejscach w treści rozprawy. Pozwoliło to na poprawne przedstawienie poszczególnych zagadnień i dowodzi znajomości materii. Wszystkie te aspekty niewątpliwie potwierdzają możliwości i umiejętności Autora do prowadzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących. Pozytywnym aspektem jest np. fakt, iż doktorant charakteryzując metody pomiaru chropowatości i topografii powierzchni (str. 19) unika nazw handlowych urządzeń utożsamianych często z daną metodą, natomiast używa poprawnych nazw poszczególnych technik.

Pomimo wysokiego poziomu omawianej pracy i jej ogólnego pozytywnego odbioru wskazać można pewne fragmenty i sformułowania, które poniżej prezentuję bardziej szczegółowo w postaci uwag krytycznych i polemicznych:

- W rozdziale 1 Autor przedstawił szeroki opis wzorców historycznych. Zawarto tam wiele ciekawostek historycznych, jednak można było zastanowić się na skróceniu tego opisu.
- Str. 15 – Doktorant używa określenia „*miara katolicka*”. Jest ono poprawne, jednak w literaturze można również znaleźć tłumaczenie jako „*miara powszechna*”, co w mojej ocenie bardziej odpowiada celowi jaki przyświecał twórcom, by upowszechnić wzorce w czasach historycznych.
- Str. 22 – Autor pisze, że „*W przypadku pomiarów optycznych znaczący wpływ na wiarygodność uzyskiwanych wyników ma problematyka związane z punktami niezmiernymi*”. Raczej powinniśmy mówić o zjawisku, bądź fakcie dotyczącym punktów niezmiernych, niż o problematyce. Ponadto wskazane byłoby poszerzenie tej informacji i nie zostawianie jej, jako jednozdaniowego faktu.
- Str. 39 – w mojej ocenie brakuje choćby krótkiego podsumowania rozdziału I.
- Str. 41 – przedstawiona definicja „*Rozdzielczość przyrządu*” wymaga w mojej ocenie doprecyzowania.
- Str. 44 – przedstawiona definicja „*Wierności topografii*” wymaga w mojej ocenie doprecyzowania.
- Str. 76 i 77 – Autor podaje wzory do obliczania szumu pomiarowego wyznaczanego metodą odejmowania dla różnych przypadków. Każdy z nich został opisany symbolem NM - można było pokusić się o dodanie indeksów / oznaczeń dla większej jednoznaczności zapisu.
- Str. 81 / rys. 24 – cenne byłoby przedstawienie wykazu urządzeń stosowanych w badania w ramach projektu PBS. Zastosowanie samych skrótów nie pozwala lub utrudnia określenie choćby które z urządzeń to przyrządy stykowe, a które optyczne.
- Str. 89 i 90 / rys. 27 i 28 – wykresy zawierają w znacznej mierze te same dane. Rysunek 28 powinien zawierać jedynie wartości dla serii pomiarowych, bądź należało zrezygnować z rys. 27. Uwaga ta dotyczy również par rysunków: 31/32; 34/35; 38/39; 42/43.

- Str. 105 i 106 / tab. 44 – dlaczego dla profilometru firmy Altimet wskazano 3 nazwy (A520, A520_CL1, A520_CL2), co skutkuje potrójnym zestawem danych (tab. 45), podczas, gdy dla pozostałych przypadków zaprezentowano tylko jeden zestaw danych?
- Str. 108 – Autor pisząc o analizie wyników pomiarów stykowych podaje, że „...występuje bardzo dobra zgodność wyników...”. Warto by poprzeć to wartością liczbową. Jednocześnie dla przyrządów optycznych podaje, iż „... rozstęp wyników jest znaczący i wynosi od 76,2 nm do 159,1 nm”. Rozstęp jest miarą rozrzutu – zatem należało podać, że wartość zawiera się we wspomnianym przedziale, bądź rozstęp ten wynosi 82,9 nm.
- Str. 112 – Autor wykonał pomiary wzorców ASP (o średnicy 40 μm oraz 140 μm) z zastosowaniem przyrządu Talysurf CCI stosując powiększenie 50x oraz Leica DCM8 z powiększeniem 100x. W tekście nie znalazło się wyjaśnienie dlaczego zastosowano takie powiększenia. Szkoda, że dla urządzenia Leica DCM8 nie przedstawiono wyników dla powiększenia 50x w celu porównania przyrządów lub 150x co odpowiadałoby największemu możliwemu do uzyskania powiększeniu. Jeśli chodzi o analizę wyników – dlaczego dla wzorców ASP wyznaczono wartości na okręgach o średnicach odpowiednio 15 μm oraz 35 μm ?
- Str. 111-117 – Doktorant przedstawił w podrozdziale 4.3.1. wyniki dla pomiaru wzorca ASP. Szkoda jednak, że nie dokonał ich omówienia i porównania. Wspomniał w podsumowaniu, że wzorec ASP cechuje się wadami, które uniemożliwiły wyznaczenie rozdzielczości poziomej przyrządów. Nie wspomina jednak jakie to wady.
- Str. 117-119 – podrozdział 4.3.2. – zawiera wyniki pomiarów wzorca typu ACG. Szkoda, że Autor ograniczył się jedynie do podania wyników i obrazów trójwymiarowych. Brakuje podsumowania oraz opracowania uzyskanych w wyniku pomiarów danych pochodzących z mikroskopu AFM. Ponadto wzorec ACG zawiera 14 zestawów schodków umieszczonych w kolejnych wierszach – nie oznaczono, w którym kierunku i na którym przekroju prezentowane wartości (rys. 58) są wyznaczone. Cenna mogłaby być również analiza porównawcza poszczególnych przekrojów w obu kierunkach.
- Str. 119-120 – podrozdział 4.3.3. – czy znane są wartości referencyjne parametrów S_a oraz S_r dla zastosowanego w badaniach wzorca AIR? Pozwoliłoby to na ocenę uzyskanych wartości, natomiast w prezentowanym przypadku możemy jedynie stwierdzić, iż wzrost powiększenia powoduje spadek wartości dla parametru S_a .
- Str. 122 – omawiając charakterystyki metrologiczne, jakie mogą być weryfikowane z użyciem opracowanego przez Doktoranta wzorca wyróżniono oś pionową α_z oraz osie poziome α_x oraz α_y . Należy domniemywać, iż chodzi w tym przypadku o weryfikację liniowości.
- Str. 122 – podrozdział 5.3. – Autor podaje, że będzie stosował kule ceramiczne o średnicy 9,51 mm. Jakimi względami był podyktowany wybór takiej średnicy?
- Str. 124 / rys. 63 i 64. Nie jest jasne, jak realizowany jest obrót elementów wzorcowych w przypadku, gdy śruba mikrometryczna zamontowana jest w przedstawiony na rysunkach sposób. Interesujące jest również, jak kule wzorcowe zamocowano we wzorcu, aby uniknąć ich ewentualnego przemieszczania.

- Str. 134 / tab. 56 i 57 – Autor podaje „*Współrzędne poszczególnych kul...*”, ale nie określa, czy ma na myśli środek, biegun, czy też inny punkt kuli. Doktorant przedstawia także wyniki pomiarów dla „*odległości poszczególnych kul*”. Brakuje jednak stwierdzenia, czy są to odległości pomiędzy odpowiednimi biegunami kul, czy też pomiędzy ich środkami. Brakuje również informacji, czy ta odległość to najkrótszy odcinek przestrzenny pomiędzy wskazanymi punktami, czy np. odległość rzutowana na płaszczyznę czołową wzorca.
- Str. 138 – Czy podczas wzorcowania profilometru TOPO 02 pomiaru 3 kul ułożonych w jednej osi dokonano w jednym przejściu pomiarowym, czy każdą z kul mierzono oddzielnie? Jak wyznaczono miejsce pomiaru przechodzące przez biegun?
- Str. 140 – W odniesieniu do danych zawartych w tablicy 60 Autor pisze, że „*otrzymane wyniki obrazują typowy dla czujników indukcyjnych brak liniowości charakterystyki w górnych częściach zakresu pomiarowego*”. Obserwując wykresy (tab. 60) można stwierdzić, że ten brak liniowości dotyczy skrajnych wskazań czujnika – odnoszący się zarówno do wartości minimalnych, jak i maksymalnych.
- Str. 142/143 – wyniki przedstawione na rys. 78 są mało czytelne. Bardziej korzystne mogłyby być zestawienie tabelaryczne wraz z danymi referencyjnymi. Brakuje również podsumowania wyników badań zawartych w podrozdziale 5.9.

Podczas opracowania niniejszej dysertacji mgr inż. Tomasz DOBROWOLSKI nie ustrzegł się pewnych błędów edycyjnych i językowych. Przytaczam dla porządku kilka przykładów niezręczności językowych, jakie znalazły się w treści rozprawy:

- Str. 7 jest „...*wyniki pomiarów przyrządów nie zmieniają się znacząco z czasem.*” – lepiej byłoby napisać „...*wyniki pomiarów uzyskane za pomocą poszczególnych przyrządów nie zmieniają się znacząco w czasie.*”
- Str. 11 – przy opisie jednostek antycznych np. stopy attyckiej brakuje informacji, że jej wielkość odpowiada 0,296 m, podobnie dla stopy pergamońskiej 0,330 m.
- Rys. 3 – nie wskazano źródła literaturowego prezentowanego rysunku.
- Str. 20 / tab. 1 – nie skazano źródła literaturowego prezentowanych parametrów urządzeń.
- Str. 20 i dalej – pojawiają się przywołania norm jako źródeł informacji. Powinny one być numerowane podobnie jak literatura zgodnie z kolejnością wprowadzania w tekście
- Str. 22 – błędnie podano odwołanie do słownika VIN – zamiast N32 powinno być N33 z wykazu norm.
- Str. 23 / rys. 9 – nie wskazano źródła literaturowego prezentowanego rysunku.
- Str. 26 / tab. 2 oraz str. 31 / tab. 3 – można było pokusić się o podanie polskich nazw poszczególnych parametrów topografii powierzchni.
- Str. 33 – „*W przypadku metrologii wieloskalowej, która zajmuje się....*” - powinno być „*wielkoskalowej*”.
- Str. 34 / rys. 13 – źródło literaturowe obrazu powinno być wskazane bardziej precyzyjnie.

- Str. 40 – Autor pisze: „... wykorzystanie metod optycznych topografii powierzchni jest obecnie niewielkie” – powinno być „... wykorzystanie metod optycznych w pomiarach topografii powierzchni jest obecnie niewielkie”.
- Str. 42 – powinno być „... z wartością...” zamiast „...z wartością...”.
- Tablice 7-29 – zamiast „Przykład pomiaru” powinno być „Przykład wyniku pomiaru”.
- Str. 74 / rys. 21 – nie wskazano źródła literaturowego prezentowanego rysunku.
- Str. 74 / rys. 22 – źródło powinno być podane w spisie literatury, a nie jako adres www pod rysunkiem.
- Str. 82 – znalazło się stwierdzenie „...w porównaniu wzięło udział dwanaście przyrządów...” – raczej „...w badaniach porównano wyniki uzyskane za pomocą 12 przyrządów...” lub „...w porównaniach analizowano wyniki z 12 przyrządów...”.
- Str. 85 – „W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań wykonanych przez autora wybranych typów wzorców...” – powinno być „W rozdziale czwarty przedstawiono wyniki badań wykonanych przez autora dla wybranych typów wzorców...”.
- Str. 116 – Autor pisze: „Wyniki pomiarów szerokości rowków wzorca ASP o średnicy 140 μm uzyskanych po przez kołowe przekroje na różnych promieniach pokazały możliwość zastosowania do wzorcowania przyrządów optycznych tego typu wzorca”. Zdecydowanie zgrabniej byłoby napisać: „Wyniki pomiarów szerokości rowków wzorca ASP o średnicy 140 μm , uzyskanych poprzez kołowe przekroje o różnych promieniach, pokazały możliwość wzorcowania przyrządów optycznych przy zastosowaniu tego typu wzorca”. Ponadto słowo „poprzez” należy pisać łącznie.

Oceniając analizowaną dysertację należy podkreślić, iż drobne błędy gramatyczne i edycyjne nie wpływają negatywnie na jej treść. Jest ona napisana starannie, poprawnym językiem polskim. Zawarte w pracy rysunki obrazują zagadnienia związane z prezentowanymi treściami, przeprowadzonymi badaniami oraz uzyskanymi wynikami stanowiąc ich odpowiednie uzupełnienie.

4. Wnioski

Mimo uwag krytycznych i zasygnalizowanych problemów ujętych w niniejszej recenzji stwierdzam, że Autor przedstawił koncepcję naukową, co dowodzi, że opanował podstawy metodologii i metodyki pracy badawczej, niezbędne do prowadzenia badań. Oceniana praca jest dziełem zawierającym szereg informacji na temat pomiarów chropowatości i topografii powierzchni, metod pomiarowych oraz zasad weryfikacji poprawności metrologicznej stykowych i optycznych urządzeń pomiarowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie autorskiego wzorca do sprawdzania poprawności działania profilometrów stykowych 3D cechującego się relatywnie dużym zakresem w osiach poziomych i osi pionowej.

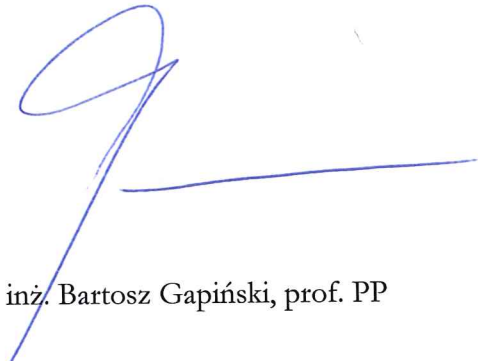
Należy również podkreślić, iż przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza DOBROWOLSKIEGO cechuje się właściwym ułożeniem treści oraz bogatym



materiałem graficznym. Dowodzi to, iż Doktorant opanował szeroki zakres wiedzy w sposób, który umożliwi mu korzystanie z niej we właściwy sposób i pozwoli na dalsze rozwijanie własnej dalszej działalności badawczej. Podjęta tematyka badawcza jest żywa i aktualna. Została wybrana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dysertacja w wielu elementach wnosi treści nowe, a cele pracy zostały osiągnięte. Rozpatrywana rozprawa należy do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna w dziedzinie nauk Inżynieryjno – Technicznych i zdaniem recenzenta stanowi istotny wkład w jej rozwój.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasza DOBROWOLSKIEGO pt.: „*Analiza metrologiczna wzorców stosowanych do pomiarów chropowatości powierzchni*”, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 t.j. ze zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.



dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP