

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji

Załącznik nr3

do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia
doktora habilitowanego

Autoreferat

dr inż. Przemysław Podulka

Rzeszów, dn. 30.12.2025

Autoreferat – Przemysław Podulka

Spis treści

1. Imię i nazwisko	5
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	5
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	7
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	9
4.1. Wprowadzenie – zdefiniowanie i uzasadnienie wyboru obszaru badawczego	12
4.2. Charakterystyka celu naukowego oraz wyników prac składających się na spójny tematycznie cykl publikacji	13
4.2.1. Analiza zakłóceń wysokoczęstotliwościowych za pomocą zdefiniowania powierzchni szumu	14
4.2.2. Analiza szumu za pomocą funkcji widmowej gęstości mocy	16
4.2.3. Wyniki uzyskane po analizie kształtu funkcji autokorelacji	19
4.2.4. Analiza profilowa powierzchni z uwzględnieniem kierunku wyodrębnienia	22
4.2.5. Zastosowanie funkcji odcięcia danych	25
4.2.6. Zaproponowana metodyka badań	27
4.2.7. Walidacja zaproponowanej metodyki	33
4.3. Zestawienie wykonanych badań naukowych	37
4.4. Podsumowanie	44
4.5. Literatura	46
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej	49
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	53
7. Inne informacje dotyczące uzyskanych osiągnięć oraz kariery zawodowej wnioskodawcy	55

Autoreferat – Przemysław Podulka

Autoreferat – Przemysław Podulka

1. Imię i nazwisko.

Przemysław Jakub Podulka

Baza	Identyfikator
ORCID	0000-0002-1699-3137 https://orcid.org/0000-0002-1699-3137
Scopus	Scopus ID: 57217846857 https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57217846857
WoS	Researcher ID: S-5235-2019 https://www.webofscience.com/wos/author/record/S-5235-2019

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.

stopień doktora	rok uzyskania: 2017 podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa dyscyplina: budowa i eksploatacja maszyn dziedzina: nauki techniczne tytuł rozprawy doktorskiej: Dobór powierzchni odniesienia w pomiarach struktury geometrycznej promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Pawlus, Politechnika Rzeszowska promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Dobrzański, Politechnika Rzeszowska recenzenci: prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski, Politechnika Poznańska prof. dr hab. inż. Dariusz Janecki Politechnika Świętokrzyska
tytuł magistra	rok uzyskania: 2009 podmiot nadający: Uniwersytet Rzeszowski kierunek studiów: edukacja techniczno-informatyczna specjalność: nauczycielska tytuł pracy magisterskiej: Kompresja dźwięku w telefonii internetowej. VoIP – platforma edukacji na odległość. promotor: prof. dr hab. inż. Wasyl Czaban
tytuł inżyniera	rok uzyskania: 2013 podmiot nadający: Uniwersytet Rzeszowski kierunek studiów: edukacja techniczno-informatyczna specjalność: sieci komputerowe

Autoreferat – Przemysław Podulka

tytuł pracy inżynierskiej: Eksploracja i analiza parametrów powierzchni mierzonych profilometrem z zastosowaniem algorytmów cyfrowych.

promotor: dr hab. inż. Tadeusz Kwater, prof. UR

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

01.09.2017 – do chwili obecnej	Adiunkt w: Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
03.03.2014 – 02.03.2017	Kierownik projektu naukowego „Dobór powierzchni odniesienia w pomiarach struktury geometrycznej” w: Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Autoreferat – Przemysław Podulka

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

Jako osiągnięcie naukowe wskazuję jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany „Redukcja błędów pomiaru i analizy struktury geometrycznej powierzchni”, który składa się z powiązanych tematycznie następujących osiemnastu artykułów naukowych: (podano wg. daty publikacji od najnowszej, liczba cytowań na dzień 20.12.2025)

- A1** Podulka P, Felho C, Sztankovics I, Knapčíková L. *Roughness evaluation of machined Ti-6Al-4V alloys with a study of surface topography measurement noise*. Measurement 2026, 257 Part B, 118686.
IF₂₀₂₄: 5.6, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 0, Scopus: 0
- A2** Podulka P, Rudawska A, Macek W. *Study of vibrational surface topography measurement errors of LPBF Inconel 718 alloy after shot peening process*. Measurement 2025, 243, 116434.
IF₂₀₂₄: 5.6, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 6, Scopus: 6
- A3** Podulka P, Knapčíková L, Tauberová R, Martiček M, Sukić E. *Study of etched surface topography with the compensation of contactless vibrational measurement errors*. Measurement 2025, 242 Part D, 116218.
IF₂₀₂₄: 5.6, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 4, Scopus: 5
- A4** Podulka P, Macek W, Owsiański R, Branco R, Trembacz J. *Roughness measurement results evaluation of 6082 aluminium alloy specimens after fatigue bending tests*. Precision Engineering 2024, 91, 77-94.
IF₂₀₂₃: 3.5, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 4, Scopus: 4
- A5** Podulka P, Macek W, Zima B, Kopec M, Branco R, Achtelik H. *Fracture surface topography measurements analysis of low-alloyed corrosion resistant steel after bending-torsion fatigue tests*. Precision Engineering 2024, 89, 296-316.
IF₂₀₂₃: 3.5, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 7, Scopus: 7

Autoreferat – Przemysław Podulka

- A6** **Podulka P**, Macek W, Branco R, Kubit A. *Laser-textured cross-hatched surface topography analysis with evaluation of high-frequency measurement noise*. Measurement 2024, 235, 114988.
IF₂₀₂₃: 5.2, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 6, Scopus: 6
- A7** **Podulka P**, Macek W, Szala M, Kubit A, Das KC, Królczyk G. *Evaluation of high-frequency roughness measurement errors for composite and ceramic surfaces after machining*. Journal of Manufacturing Processes 2024, 121, 150-171.
IF₂₀₂₃: 6.1, MNiSW: 140 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 13, Scopus: 14
- A8** **Podulka P**, Macek W, Rozumek D, Żak K, Branco R. *Topography measurement methods evaluation for entire bending-fatigued fracture surfaces of specimens obtained by explosive welding*. Measurement 2024, 224, 113853.
IF₂₀₂₃: 5.2, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 21, Scopus: 21
- A9** **Podulka P**, Macek W, Zima B, Lesiuk G, Branco R, Królczyk G. *Roughness evaluation of turned composite surfaces by analysis of the shape of autocorrelation function*. Measurement 2023, 222, 113640.
IF₂₀₂₂: 5.6, MNiSW: 200 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 22, Scopus: 25
- A10** **Podulka P**. *Thresholding methods for reduction in data processing errors in the laser-textured surface topography measurements*. Materials 2022, 15, 5137.
IF₂₀₂₁: 3.748, MNiSW: 140 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 15, Scopus: 15
- A11** **Podulka P**. *Selection of methods of surface texture characterisation for reduction of the frequency-based errors in the measurement and data analysis processes*. Sensors 2022, 22, 791.
IF₂₀₂₁: 3.847, MNiSW: 100 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 24, Scopus: 28

Autoreferat – Przemysław Podulka

- A12** **Podulka P.** *Suppression of the high-frequency errors in surface topography measurements based on comparison of various spline filtering methods.* Materials 2021, 14, 5096.
IF₂₀₂₀: 3.623, MNiSW: 140 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 24, Scopus: 26
- A13** **Podulka P.** *The effect of surface topography feature size density and distribution on the results of a data processing and parameters calculation with a comparison of regular methods.* Materials 2021, 14, 4077.
IF₂₀₂₀: 3.623, MNiSW: 140 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 29, Scopus: 30
- A14** **Podulka P.** *Improved procedures for feature-based suppression of surface texture high-frequency measurement errors in the wear analysis of cylinder liner topographies.* Metals 2021, 11, 143.
IF₂₀₂₀: 2.351, MNiSW: 70 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 22, Scopus: 25
- A15** **Podulka P.** *Reduction of influence of the high-frequency noise on the results of surface topography measurements.* Materials 2021, 14, 333.
IF₂₀₂₀: 3.623, MNiSW: 140 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 27, Scopus: 28
- A16** **Podulka P.** *Fast Fourier transform detection and reduction of high-frequency errors from the results of surface topography profile measurements of honed textures.* Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2021, 23, 84–89.
IF₂₀₂₀: 2.176, MNiSW: 140 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 21, Scopus: 21
- A17** **Podulka P.** *Comparisons of envelope morphological filtering methods and various regular algorithms for surface texture analysis.* Metrology and Measurement Systems 2020, 27, 243–263.
IF₂₀₁₉: 1.093, MNiSW: 100 pkt.
Liczba cytowań: WOS: 27, Scopus: 32

A18 Podulka P. *The effect of valley depth on areal form removal in surface topography measurements.* Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 2019, 67, 391–400.

IF₂₀₁₈: 1.277 MNiSW: 100 pkt.

Liczba cytowań: WOS: 14, Scopus: 17

Wymienione wyżej prace załączono do wniosku w pełnej ich wersji w formie załącznika nr 5 – Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy.

4.1. Wprowadzenie – zdefiniowanie i uzasadnienie wyboru obszaru badawczego

Analiza topografii znalazła szerokie zastosowanie w wielu obszarach badań związanych z właściwościami powierzchni [1]. W inżynierii mechanicznej najczęściej jest ona kojarzona z analizą właściwości tribologicznych powierzchni i nazywana strukturą geometryczną powierzchni (SGP) [2]. Jako zbiór wszystkich nierówności, SGP jest dzielona na zarys kształtu, falistość oraz chropowatość. W wielu przypadkach topografię powierzchni analizuje się wyodrębniając chropowatość od zarysu kształtu oraz falistości. W tym celu stosuje się odpowiednie algorytmy cyfrowe, gdzie jednym z najczęściej stosowanych jest filtr cyfrowy oparty na funkcji Gaussa [3], zdefiniowany przez międzynarodowe normy jako filtr Gaussa [4].

W literaturze filtracji danych pomiarowych SGP można znaleźć prace odnoszące się do separacji chropowatości od pozostałych składowych topografii powierzchni [5, 6]. Powierzchnię względem której oblicza się parametry chropowatości nazywa się powierzchnią odniesienia [7], dlatego więc wyznaczając odpowiedni algorytm do separacji chropowatości powierzchni od jej zarysu kształtu oraz falistości dobiera się powierzchnię odniesienia, a jej nieprawidłowe wyznaczenie może spowodować znaczny wzrost błędów kalkulacji parametrów chropowatości [8].

Nieprawidłowości w wyznaczaniu parametrów chropowatości mogą być również związane z błędami spowodowanymi pomiarem. Metody pomiarowe topografii powierzchni można podzielić na dwie podstawowe grupy, metody stykowe oraz metody bezstykowe. Historycznie, metody stykowe stanowią od kilkudziesięciu lat podstawową metodę pomiaru i ewaluacji topografii powierzchni [9]. Mierząc dany materiał metodami stykowymi profil po profilu, można było uzyskać odwzorowanie całej powierzchni [10]. Jedną z największych korzyści tego typu pomiarów była względnie niska skłonność do błędów wywołanych wpływem otoczenia systemu pomiarowego.

Wraz z rozwojem technologii pomiarów SGP pojawiły się metody bezstykowe [11]. Największą korzyścią stosowania metod bezstykowych względem metod stykowych był znacznie krótszy czas wykonania pomiaru [12, 13]. Przynosiło to wiele korzyści dla systemów pomiarowych stosowanych w procesach produkcyjnych o automatycznym przebiegu, gdzie kontrola jest wymagana w trybie bieżącym [14]. Niestety, pomiary bezstykowe mogą być obciążone wieloma błędami spowodowanymi

wpływem otoczenia systemu pomiarowego.

Jednym z błędów występujących podczas pomiaru topografii powierzchni są zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, zwane także szumem wysokoczęstotliwościowym [15]. Głównym źródłem powstawania tego typu zakłóceń są wibracje występujące podczas wykonywania pomiaru [16]. Międzynarodowe standardy definiują zakłócenia pomiarowe jako sygnał dodany do sygnału mierzonego podczas normalnego wykorzystania urządzenia pomiarowego [17]. Jedną z metod minimalizacji wpływu zakłóceń wibracyjnych jest co najmniej trzykrotne powtórzenie pomiaru oraz uśrednienie uzyskanych wyników [18]. Metoda ta wydaje się być najlepsza pod względem dokładności finalnych wyników pomiaru struktury geometrycznej powierzchni z uwzględnieniem minimalizacji błędów wibracji. Jednak pod względem całkowitego czasu uzyskania wyników pomiaru, może wydawać się niekorzystna, w szczególności w warunkach przemysłowych. Dlatego też poszukiwanie alternatywnych metod pozwalających skrócić czas uzyskania wyników bezstykowych pomiarów topografii powierzchni jest punktem wyjścia dla szerokich badań naukowych.

Bazując na poszukiwaniu szybkiej i zarazem prostej metody do minimalizacji wpływu wibracji na wyniki pomiaru struktury geometrycznej powierzchni, zastosowanie zbyt skomplikowanych i wymagających długiej implementacji rozwiązań nie jest pożądane w praktyce inżynierskiej, do częstych pomiarów i analiz topografii powierzchni. W literaturze można znaleźć wiele złożonych, wymagających dodatkowych obliczeń, implementacji rozbudowanych algorytmów oraz procedur rozwiązań [19, 20, 21, 22]. Oprócz dodatkowego czasu, często wymagają one dużej wiedzy numerycznej, programistycznej oraz obsługi dodatkowych programów przetwarzania danych.

Celem ciągu badań naukowych było zaproponowanie szybkiej i łatwej w implementacji metody do oceny występowania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych, a także służącej do doboru najlepszego filtra minimalizującego wpływ tychże zakłóceń na wyniki pomiaru struktury geometrycznej powierzchni.

W zaprezentowanych badaniach naukowych, duży nacisk położono na czasochłonność i łatwość implementacji nowych rozwiązań, jednocześnie odnosząc się i porównując uzyskane wyniki do metod stosowanych przez innych badaczy, między innymi opartych na uśrednianiu powtarzanych rezultatów pomiaru.

4.2. Charakterystyka celu naukowego oraz wyników prac składających się na spójny tematycznie cykl publikacji

Przydatność danej metody filtracji do minimalizacji wpływu wibracyjnych zakłóceń pomiarowych analizowano za pomocą oceny składowej reprezentującej sygnał pomiarowy w odpowiedniej częstotliwości. W przypadku branego pod uwagę błędu pomiarowego, były to zakłócenia wysokoczęstotliwościowe zwane również szumem wysokoczęstotliwościowym. Zgodnie z międzynarodową definicją szumu pomiarowego, jest to sygnał dodany do tego prawdziwego, spowodowany występowaniem wpływu warunków otoczenia systemu pomiarowego i należy minimalizować jego wpływ na wyniki końcowe [17].

Traktując wyniki pomiaru jako sygnał, zastosowanie filtracji cyfrowej ma za zadania odseparowanie danych klasyfikowanych jako błędy od danych rzeczywistych. Celem redukcji wpływu zakłóceń wibracyjnych na wyniki pomiaru topografii powierzchni będzie odseparowanie sygnału wysokoczęstotliwościowego od pozostałych sygnałów pomiarowych. W praktyce nigdy nie wiadomo jaka składowa sygnału wyniku pomiaru jest składową rzeczywistą, a jaka z kolei może być uznana za błędy pomiarowe. Dlatego też bardzo istotny jest dobór odpowiedniej metody separacji wibracyjnych błędów pomiaru topografii powierzchni.

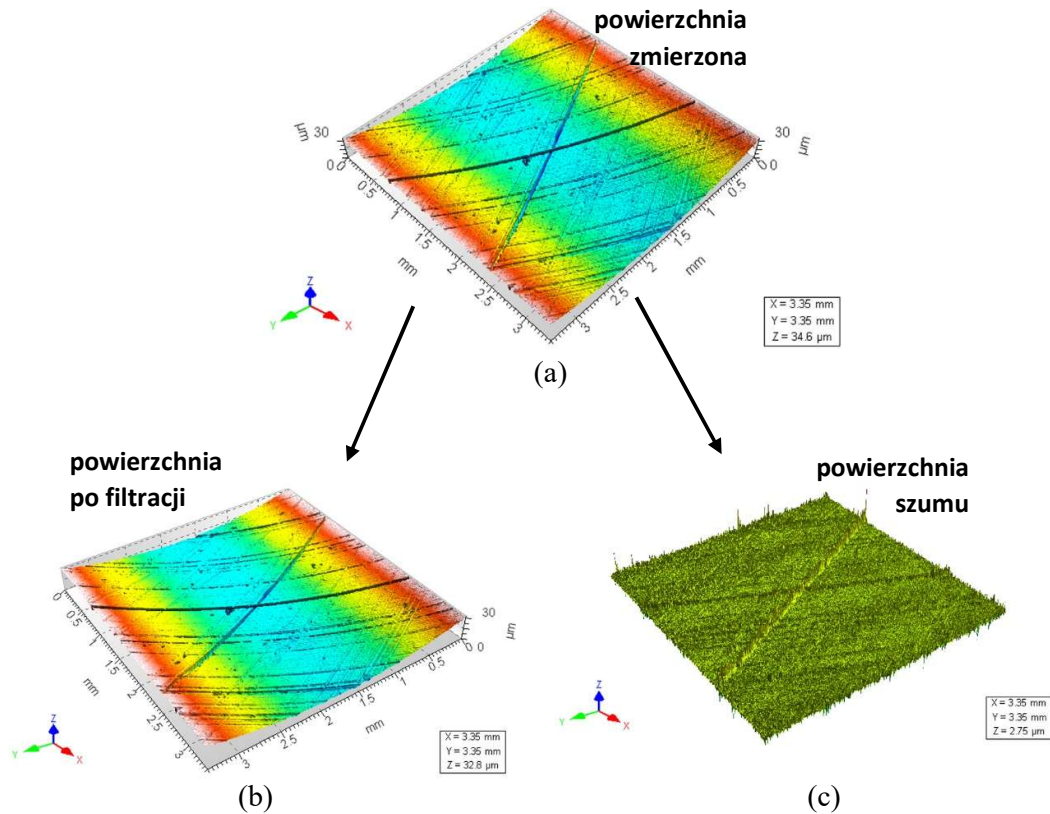
Zakres tematyczny zawarty w przedstawionym do oceny cyklu publikacji obejmuje następujące zagadnienia:

1. Opracowanie metodologii doboru filtracji cyfrowej do minimalizacji wpływu wibracyjnych zakłóceń pomiarowych SGP.
2. Przedstawienie metod pozwalających ocenić w sposób bardziej precyzyjny występowanie zakłóceń wysokoczęstotliwościowych w uzyskiwanych wynikach pomiaru SGP.
3. Definicja powierzchni szumu, jej oczekiwanych właściwości oraz cech charakterystycznych.
4. Propozycje metod stosowania funkcji widmowej gęstości mocy, funkcji autokorelacji oraz funkcji odcięcia danych w analizie wibracyjnych błędów pomiarowych topografii powierzchni.
5. Analiza powierzchniowa oraz profilowa wraz z uwzględnieniem kierunku wyodrębnienia danych.
6. Zdefiniowanie alternatywnej do standardów międzynarodowych (ISO 25178:600) metody minimalizacji wpływu zakłóceń wysokoczęstotliwościowych w pomiarze i analizie topografii powierzchni po różnych rodzajach obróbki.
7. Walidacja zaproponowanej metodologii w porównaniu z metodami uśredniania wyników pomiarów powtarzanych trzykrotnie (zgodne z ISO 25178:700).

4.2.1. Analiza zakłóceń wysokoczęstotliwościowych za pomocą zdefiniowania powierzchni szumu

Stosując algorytmy cyfrowe, zdefiniowane jako filtry cyfrowe, do filtracji danych pomiarowych, uzyskuje się dekompozycję na dwie składowe. Jedną z uzyskanych składowych są oczekiwane dane, w analizowanym przypadku są to dane nieposiadające zakłóceń typu szum wysokoczęstotliwościowy. Drugą uzyskaną składową są zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, zwane również szumem wysokoczęstotliwościowym. Na rysunku 1 zaprezentowałem przykład dekompozycji danych topografii powierzchni z zastosowaniem filtru Gausa o długości odcięcia *cut-off* równej 10 μm . W zaproponowanej metodologii badania oparłem na szczegółowej analizie składowej która jest traktowana jako zakłócenia pomiarowe wywołane wibracjami i są usuwane z danych pomiarowych. Dane te zdefiniowałem jako powierzchnię zakłóceń lub też powierzchnię szumu [A14], pojawiające się w artykułach naukowych jako (z ang.) *noise surface* lub *noisy data*. W praktyce, biorąc pod uwagę analizę zakłóceń powstałych w wyniku wibracji, jest to szum wysokoczęstotliwościowy, który należy usunąć z danych

uzyskanych za pomocą pomiaru struktury geometrycznej powierzchni.



Rysunek 1. Dekompozycja danych pomiarowych powierzchni cylindra po gładzeniu płaskowierzchołkowym zmierzonych za pomocą interferometru światła białego Talysurf CCI Lite, krok próbkowania względem osi x oraz y $3.27 \mu\text{m}$, osi z 0.01 nm , 1024 na 1024 punkty pomiarowe; uzyskana po zastosowaniu filtru Gaussa $10 \mu\text{m}$

Patrząc na rodzaj błędów które powstają podczas wibracji, analizie poddałem szum wysokoczęstotliwościowy. Zdefiniowałem następujące właściwości powierzchni szumu [A14]:

- W1:** powinna składać się tylko z wysokich częstotliwości lub też częstotliwość ta powinna być dominująca;
- W2:** inne częstotliwości nie powinny występować w powierzchni szumu lub też nie powinny być dominujące;
- W3:** powierzchnia szumu, poza składową wysokoczęstotliwościową, nie powinna zawierać innych cech, takich jak rysy, wgłębienia lub inne ślady obróbki;
- W4:** powierzchni szumu powinna być izotropowa lub też posiadać jak największy wskaźnik izotropii.

Spełnienie jak największej liczby powyższych cech pozwala sklasyfikować stosowaną do wyodrębnienia powierzchni szumu metodę filtracji za odpowiednią do eliminacji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych spowodowanych wibracjami.

Uzyskanie po procesie dekompozycji danych za pomocą zastosowania filtru cyfrowego idealnej powierzchni szumu wysokoczęstotliwościowego zweryfikowałem za

pomocą wybranych funkcji do analizy topografii powierzchni. Zastosowanie każdej z funkcji oraz metod analizy topografii powierzchni miała na celu weryfikację poszczególnych właściwości uzyskanej powierzchni szumu. Z kolei spełnienie przez powierzchnię szumu oczekiwanych dla niej cech (W1, W2, W3 oraz W4), pozwala sklasyfikować zastosowaną metodę filtracji jako odpowiednią do minimalizacji wpływu występowania zakłóceń wibracji na uzyskane wyniki pomiaru topografii powierzchni.

Jako proces walidacji, wyniki uzyskane po zastosowaniu wskazanej przez proponowaną metodologię filtrację cyfrową, porównywałem z wynikami wartości uśrednionej z trzech powtórzonych pomiarów topografii powierzchni, zgodnie z wytycznymi standardów międzynarodowych [18].

Szeroko badałem także wpływ zakłóceń wysokoczęstotliwościowych na wariancje parametrów tekstury powierzchni z normy ISO 25178. Szczególną uwagę zwracałem na zmiany wartości parametrów najbardziej narażonych na zniekształcenia występowania szumu wysokoczęstotliwościowego. Parametry te w badaniach naukowych oraz opublikowanych artykułach określiłem jako parametry czułe na szum wysokoczęstotliwościowy. W niektórych przypadkach występowanie wibracyjnych zakłóceń pomiarowych powodowało wariancje wartości tychże parametrów o ponad 100%.

4.2.2. Analiza szumu za pomocą funkcji widmowej gęstości mocy

Według definicji międzynarodowych organizacji normalizacyjnych, SGP dzielimy na trzy składowe wliczając zarys kształtu, falistość oraz chropowatość. Każda z tych składowych odpowiada określonej skali danych w niej występujących. Skale te są z kolei przypisane do odpowiednich częstotliwości danych. Zarys kształtu są to dane o największej skali, falistość o skali średniej, chropowatość natomiast o skali najmniejszej. Analizując topografię powierzchni rozkładając ją na poszczególne dane, można je charakteryzować za pomocą ich częstotliwości.

Jedną z często stosowanych funkcji do oceny częstotliwości danych jest funkcja widmowej gęstości mocy (z ang. *Power Spectral Density*, PSD). Analizując funkcję PSD można ocenić z jakich częstotliwości składają się oceniane dane, oraz jakie częstotliwości są dominujące.

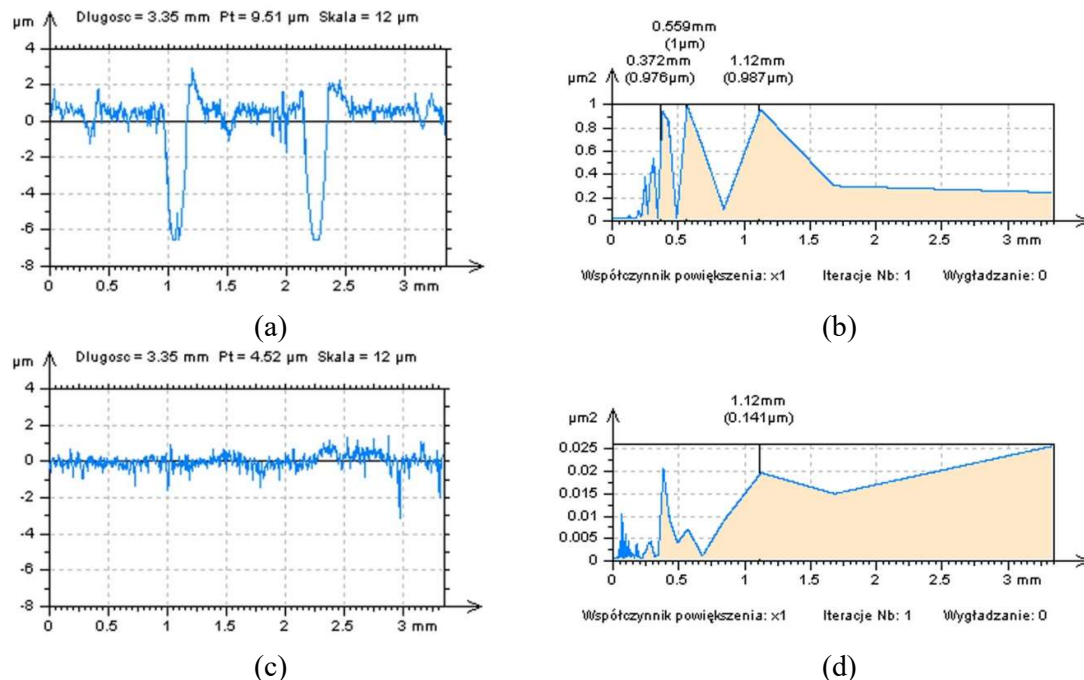
Przydatność funkcji PSD była w pierwszej kolejności analizowana pod względem detekcji występowania wybranych zakłóceń pomiarowych. Na rysunku 2 przedstawiłem wybrane profile wyodrębnione z powierzchni cylindra po gładzeniu płaskowierzchołkowym i dodatkowym wygniataniu wgłębień (kieszeni) smarowych, ułożone w różnych miejscach analizowanej powierzchni. Zauważyłem, iż na ocenę występowania (lub jego braku) danych wysokoczęstotliwościowych wpływa ułożenie na analizowanym profilu wgłębień smarowych. Jeżeli profil nie zawierał kieszeni smarowych łatwiej było ocenić obecność danych wysokoczęstotliwościowych [A13, A15, 23].

Oprócz dokładnej analizy profilowej, wnioski z zastosowania funkcji PSD w detekcji danych wysokoczęstotliwościowych potwierdziłem także dla powierzchni [A17]. Gęstość oraz rozmiar cech powierzchni typu kieszenie olejowe lub rysy oraz ich

wpływ ich występowania na proces detekcji danych wysokoczęstotliwościowych za pomocą funkcji PSD analizowałem dokładniej w publikacji [A17]. Detale powierzchni nie zawierające kieszeni olejowych czy też innych cech jak rysy lub wgłębienia (w badaniach określonych jako z ang. *out-of-dimple*, *out-of-feature* [A15, A16, 23] lub *free-of-dimple* [A12, 24, 25]) pozwalały na dokładniejsze oszacowanie za pomocą funkcji PSD czy wyniki pomiaru topografii powierzchni zawierały składowe wysokoczęstotliwościowe.

Funkcja PSD zastosowałem również do oceny składowych powierzchni szumu, czego celem było dokładne oszacowanie właściwości powierzchni szumu oznaczonej jako W1. Zgodnie z tą właściwością, dla oceny występowania szumu wysokoczęstotliwościowego, powierzchnia szumu powinien być zbiorem danych o wysokiej częstotliwości lub też powinny one być dominujące [A14].

Jeżeli powierzchnia szumu zawiera dane o innych częstotliwościach, może to wskazywać na występowanie cech powierzchni, które nie powinny być usuwane z danych pomiarowych [A6]. W praktyce eliminując szum wysokoczęstotliwościowy, powierzchnia zakłóceń powinna zawierać tylko szum oczekiwany, czyli ten o wysokiej częstotliwości.

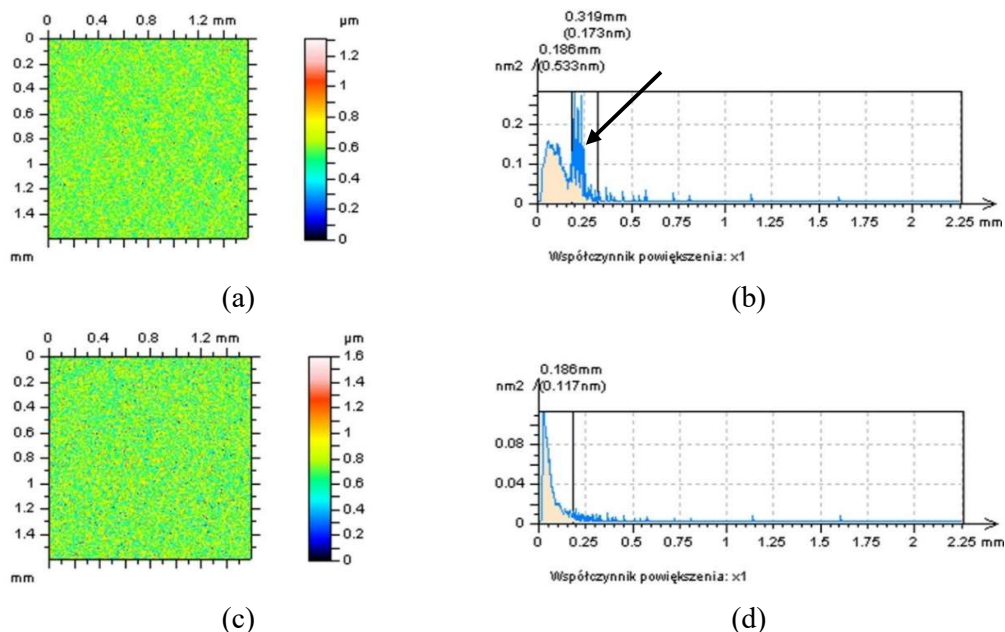


Rysunek 2. Profile powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym i wygniataaniu kieszeni smarowych: profil zawierający kieszenie smarowe (a), profil na którym nie występują wgłębienia olejowe (b), oraz odpowiednio ich funkcje widmowych gęstości mocy (c, d)

Na rysunku 3 przedstawiłem powierzchnie szumu wyznaczone dla powierzchni po teksturowaniu laserowym za pomocą filtra Gaussa (a, b) oraz filtra sklejanego (c, d); *cut-off* = 10 μm. Dla wyników po filtracji gaussowskiej, analizując funkcję PSD odnotowano częstotliwości (oznaczone strzałką na rysunku 3b), które mogą wskazywać na

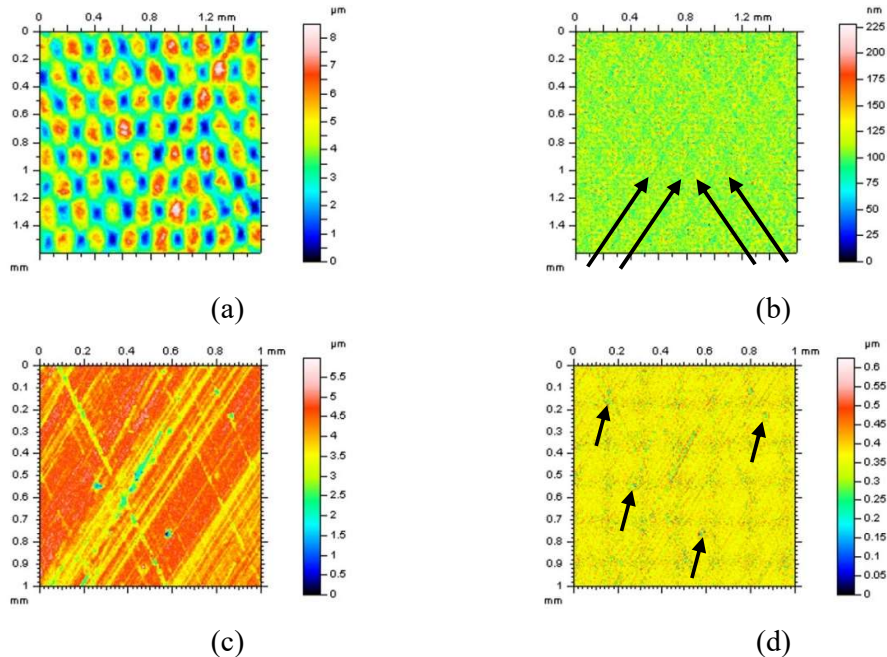
występowanie cech powierzchni niezwiązanych z analizowanym szumem. Eliminacja cech, które uzyskano podczas przygotowania powierzchni może spowodować błędne oszacowanie jej właściwości, uwzględniając analizę parametrów chropowatości z normy ISO 25178. Dla porównania, po zastosowaniu filtra sklejanego, dla badanej powierzchni po teksturuwaniu laserowym, powierzchnia szumu zawierała więcej danych o wysokiej częstotliwości. Oznacza to, iż zawierała ona mniej cech nie będącym szumem wysokoczęstotliwościowym [A6].

Stosując analizę funkcji PSD i składu częstotliwościowego uzyskiwanych poprzez filtrację cyfrową danych powierzchni szumu, uwagę zwróciłem także na sam widok izometryczny danych. W niektórych przypadkach na powierzchni szumu można było dostrzec cechy uzyskane poprzez stosowaną w wytwarzaniu danego elementu obróbkę. Cechy danych nie będących szumem zdefiniowałem dla różnych powierzchni po różnym rodzaju obróbki wykańczającej [A1, A2, A3, A6, A7, A9].



Rysunek 3. Powierzchnie szumu (a, c) oraz ich widmowe gęstości mocy (b, d) wyznaczone dla powierzchni po teksturuwaniu laserowym oraz filtracji za pomocą metody Gaussa (a, b) oraz metody funkcji sklejaney (b, d), $cut-off = 10 \mu m$

Na rysunku 4 przedstawiłem powierzchnie zmierzone za pomocą interferometrii światła białego, po teksturuwaniu laserowym (a) oraz kompozytowe po gładzeniu (c) wraz z wyznaczonymi dla nich, za pomocą filtra Gaussa ($cut-off = 10 \mu m$), powierzchniami zakłóceń wysokoczęstotliwościowych (odpowiednio c, d).



Rysunek 4. Mapy konturowe powierzchni zmierzone za pomocą interferometru światła białego (a, c) oraz ich powierzchnie szumu (b, d) wyznaczone za pomocą filtru Gaussa, $cut-off = 10 \mu m$; uzyskane dla powierzchni po teksturowaniu laserowym 60° (a, b) oraz powierzchni kompozytowej po gładzeniu (c, d)

Na powierzchniach szumu zauważyłem cechy jakie warstwa wierzchnia uzyskała po wybranych obróbkach, oznaczyłem je strzałkami. Cechy te oznaczają, iż wraz z eliminacją szumu za pomocą filtru Gaussa o długości odcięcia równej $10 \mu m$, usuwane są także niezbędne do oceny, właściwości powierzchni. Powyższa zależność znalazła zastosowanie w większości przeprowadzonych badań [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A13, A14, A15].

4.2.3. Wyniki uzyskane po analizie kształtu funkcji autokorelacji

Często stosowaną w analizie chropowatości powierzchni jest funkcja autokorelacji [26]. Analizując szczegółowo jej kształt można odczytać wiele informacji o właściwości danych poddawanych analizie. W badaniach [A4, A5, A9, A13, 27] zastosowałem funkcję autokorelacji do analizy wybranych składowych topografii powierzchni. Analizując wykres funkcji autokorelacji zauważyłem jej przydatność do określania zarysu kształtu wybranych powierzchni cylindrycznych [27].

Poprawność metody usuwania składowej zarysu kształtu z danych pomiarowych struktury geometrycznej powierzchni wraz ze szczegółową analizą wariacji parametrów chropowatości (ISO 25178) oraz wpływu głębokości wybranych cech powierzchni [A18], została zweryfikowana dodatkowo poprzez analizę wykresu funkcji autokorelacji [27].

Bardzo szczegółowym badaniem poddałem wpływ występowania składowej zakłóceń wysokoczęstotliwościowych topografii powierzchni na kształt funkcji autokorelacji [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A8, A9, A13]. Za cechę o największym znaczeniu sklasyfikowałem kształt funkcji autokorelacji w obrębie jej maksymalnej wartości

Autoreferat – Przemysław Podulka

wynoszącej '1'. Dla danych zawierających składowe o wysokiej częstotliwości wzrost funkcji w obrębie wartości maksymalnej był znacznie większy niż dla danych dla których składowe wysokoczęstotliwościowe nie zostały określone [A9].

Na rysunku 5 przedstawiłem funkcje autokorelacji o różnym kształcie, na który wpływ miało występowanie zakłóceń wysokoczęstotliwościowych o różnej amplitudzie. W przykładzie analizowałem powierzchnie płaszczy tłoków po obróbce toczenia. Dla powierzchni, u której nie odnotowałem zakłóceń pomiarowych o wysokiej częstotliwości (a, b) kształt funkcji przy wartości maksymalnej wzrastał w sposób umiarkowany w porównaniu do przypadków gdzie dane o wysokiej częstotliwości były łatwo zauważalne (c, d).

Właściwość ta została opisana za pomocą zależności poszczególnych składowych kształtu funkcji autokorelacji. Przy spełnieniu poniższych zależności:

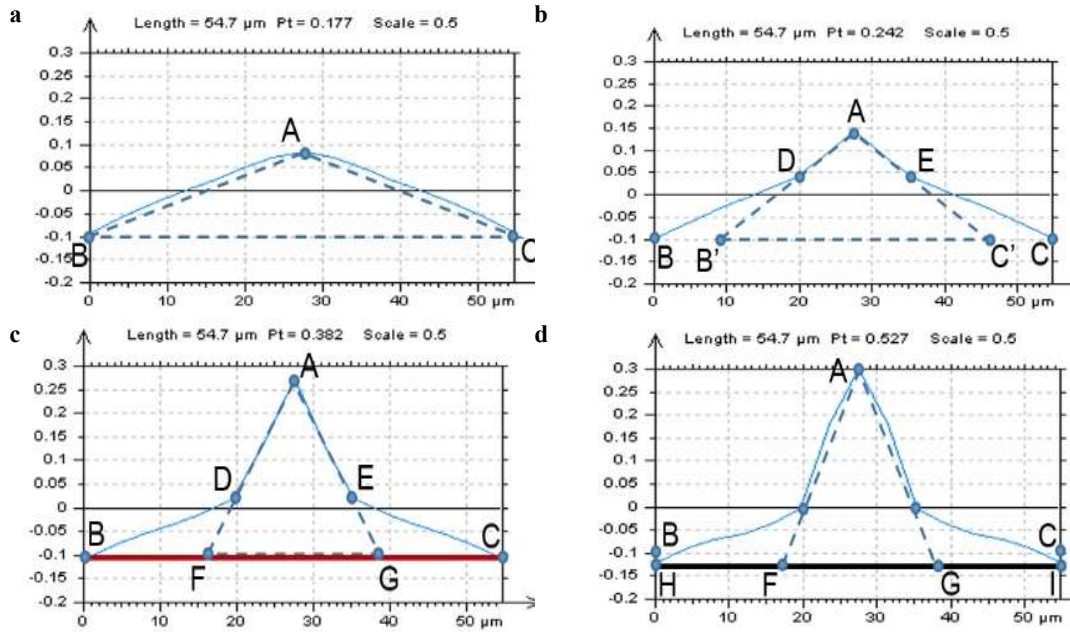
$$|BB'| + |CC'| > |B'C'|$$

$$|BF| + |CG| > |FG|$$

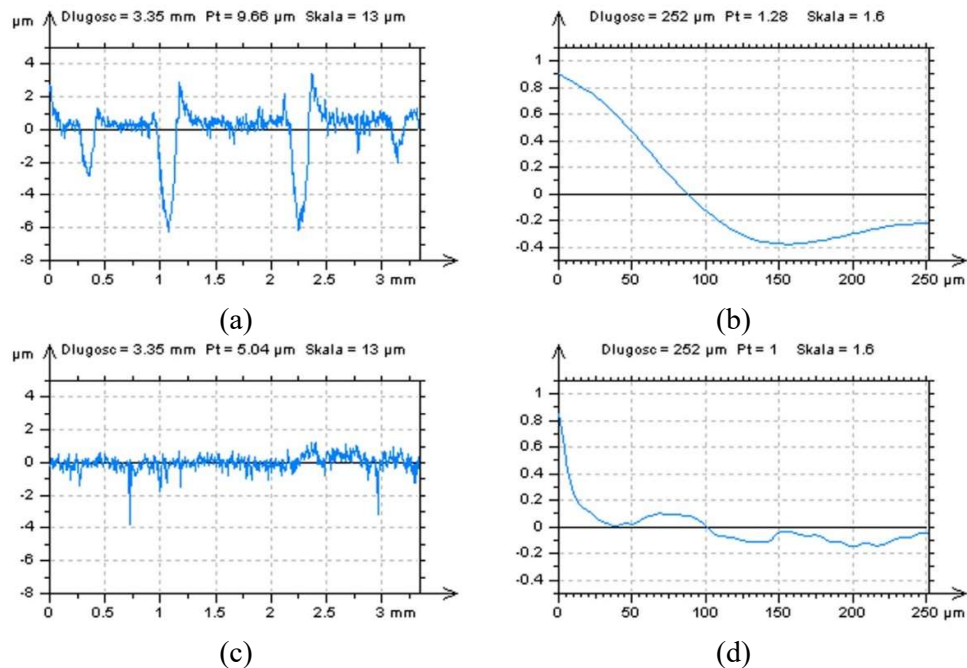
$$|HF| + |GI| > |FG|$$

należało dokonać redukcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych za pomocą doboru wybranej filtracji danych z zastosowaniem proponowanej metodologii.

Na dokładność oceny detekcji szumu o wysokiej częstotliwości za pomocą funkcji autokorelacji wpływ miało występowanie wybranych cech powierzchni, jak przykładowo wgłębienia (kieszenie) smarowe, rysy powstałe w trakcie obróbki wykańczającej. Na rysunku 6 przedstawiłem profile powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym z dodatkowymi wygniatanymi kieszeniami smarowymi (a, c) oraz ich funkcje autokorelacji (b, d). Wzrost wartości funkcji dla zakresu $0 \div 25 \mu\text{m}$ jest większy dla profilu nie zawierającego kieszenie smarowe.



Rysunek 5. Funkcje autokorelacji obliczone dla profili powierzchni toczonej płaszcza tłoka, pomierzonymi z wykorzystaniem interferometrii światła białego, z uzyskanymi różnymi wskaźnikami zakłóceń o wysokiej częstotliwości: mała (a, b) oraz duża (c, d) zawartość zakłóceń pomiarowych typu szumu wysokoczęstotliwościowy [A12]



Rysunek 6. Profile powierzchni cylindra po gładzeniu płasko wierzchołkowym i wygniataniu kieszeni smarowych: profil zawierający kieszenie smarowe (a), profil na którym nie występują wgłębienia olejowe (b), oraz odpowiednio ich funkcje autokorelacji (c, d)

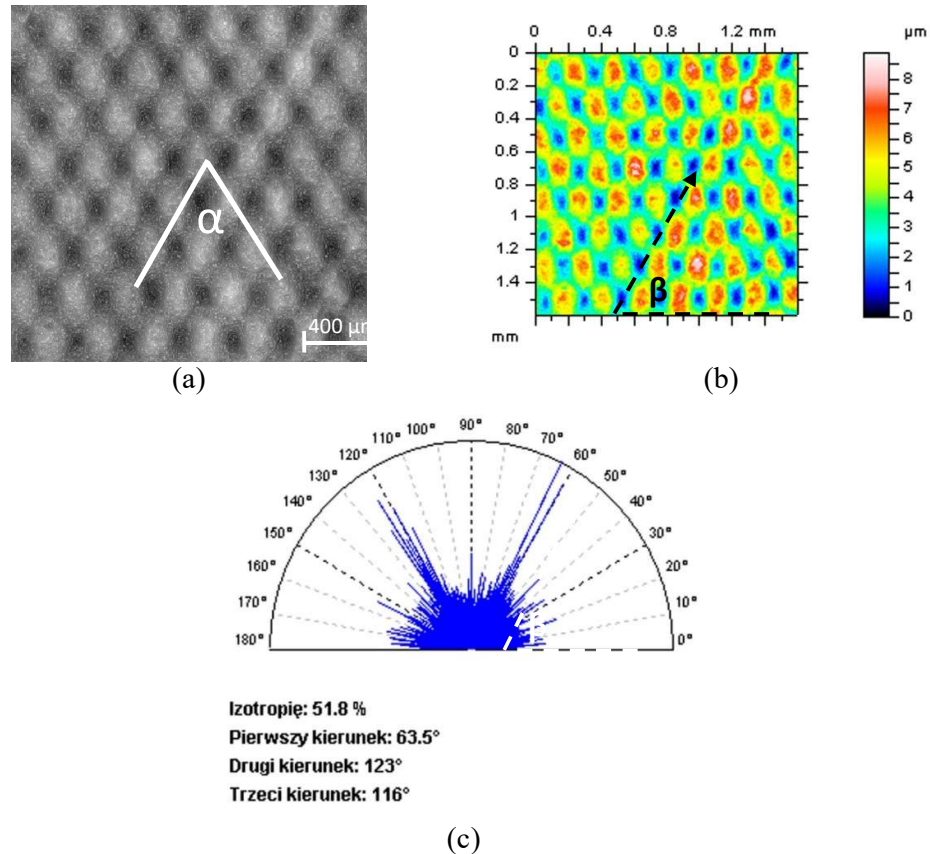
Szczegółową analizę funkcji autokorelacji zastosowałem także do oceny składu częstotliwościowego powierzchni zakłóceń o wysokiej częstotliwości [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9]. Zgodnie z cechą W1 zdefiniowaną dla powierzchni szumu, poszukiwałem największego wzrostu wartości funkcji autokorelacji w miejscu osiągnięcia wartości maksymalnej ('1'). Większy wzrost oznaczał iż powierzchni zakłóceń składa się z wysokich częstotliwości lub też częstotliwości te są dominujące. W zależności od rodzaju analizowanej powierzchni, funkcję autokorelacji badałem w zakresie rzędnej długości do 100 μm lub 250 μm .

Kształt funkcji autokorelacji oraz stopień wzrostu jej wartości potwierdzał występowanie składowych wysokoczęstotliwościowych danych, dla których funkcja była wyznaczana. Obydwie cechy funkcji autokorelacji zostały uznane za przydatne dla analizy zakłóceń pomiarowych różnych rodzajów SGP: cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym [A7, A14, A15, A16, 27], cylindrów po procesie honowania z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami smarowymi [A14, A15, A16, A17, 27, 28], toczonych [A1, A7, A9, A11, A12, A13, A15, 15, 24, 27, 29, 30], szlifowanych [A1, A7, A11, A12, A13, A15, 27, 28, 29], ceramicznych lub kompozytowych po różnych obróbkach powierzchniowych [A7, A9, A11, A12, A13, 29], po procesie kulowania [A2], teksturowanych laserowo [A6, A10, A11, A12, A13, 27, 28, 29], po procesie trawienia [A3], czy po badaniach zmęczeniowych [A4, A5, A8].

4.2.4. Analiza profilowa powierzchni z uwzględnieniem kierunku wyodrębnienia

W proponowanej metodzie redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego ważną kwestią był sposób wykrywania występowania zakłóceń pomiarowych. Na dokładność wykrywania szumu wysokoczęstotliwościowego miał kierunek analizy danych. Zastosowanie wyodrębnienia danych profili lub wykresu kierunku tekstury pozwoliło na dokładniejsze określenie składu częstotliwościowego analizowanych danych SGP. Wyodrębnienie profilu w kierunku zgodnym z kierunkiem tekstury powierzchni pozwalało na zmniejszenie średniej wysokości profilu, a to z kolei na łatwiejsze określenie występowania szumu wysokoczęstotliwościowego w analizowanych danych z zastosowaniem widmowej gęstości mocy oraz funkcji autokorelacji.

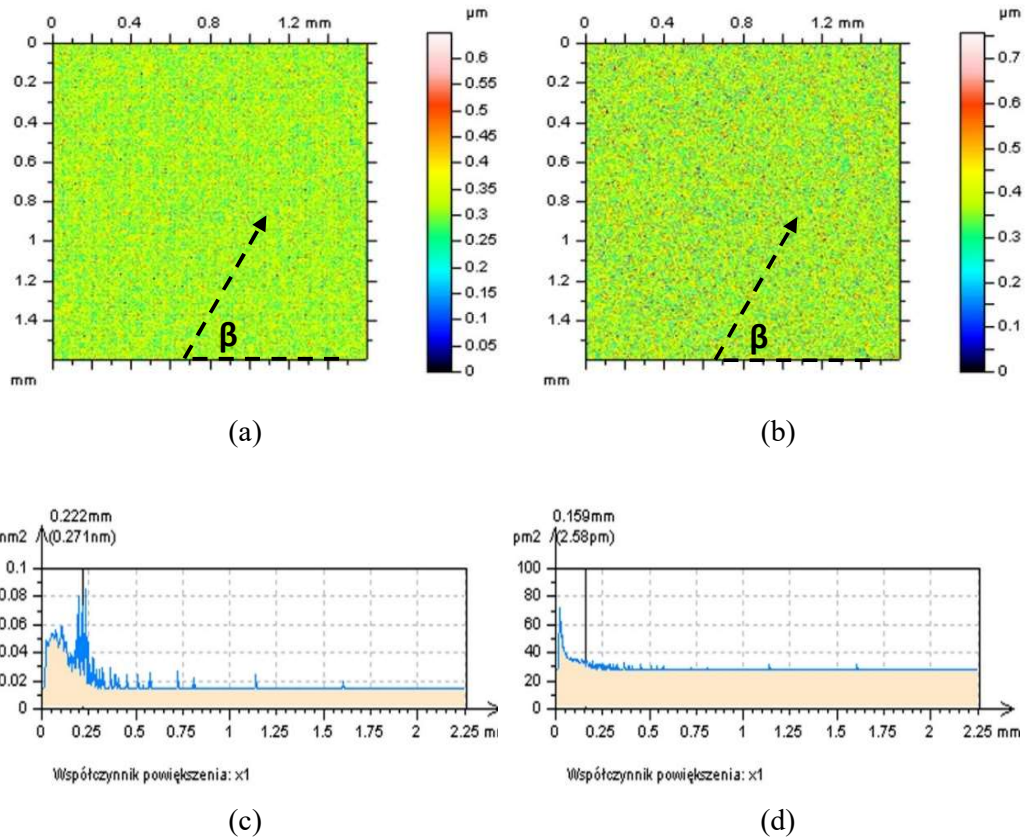
Rysunek 7 przedstawia przykład doboru kierunku wyodrębnienia profilu z powierzchni po teksturowaniu laserowym. Kąt wyodrębnienia β jest zgodny z kierunkiem obróbki laserowej, a jednocześnie jest zgodny z kierunkiem dominującym dla analizowanych danych, wyznaczonym za pomocą wykresu tekstury powierzchni. Dla większości rodzajów powierzchni obrabianych maszynowo, kierunek dominujący wyznaczony za pomocą wykresu kierunku tekstury jest zgodny z kierunkiem śladów po obróbce. Wyodrębniając w ten sposób profile powierzchni można uzyskać te z najniższą średnią wysokością. Wówczas stosunek amplitudy szumu wysokoczęstotliwościowego względem średniej wysokości profilu jest mniejszy i łatwiej jest określić jego występowanie za pomocą analizy wykresów widmowej gęstości mocy oraz funkcji autokorelacji.



Rysunek 7. Powierzchnia po teksturowaniu laserowym w widoku zdjęcia (a), topografii (b) oraz jej wykres kierunku struktury (c) z wyznaczonym kątem dominującym

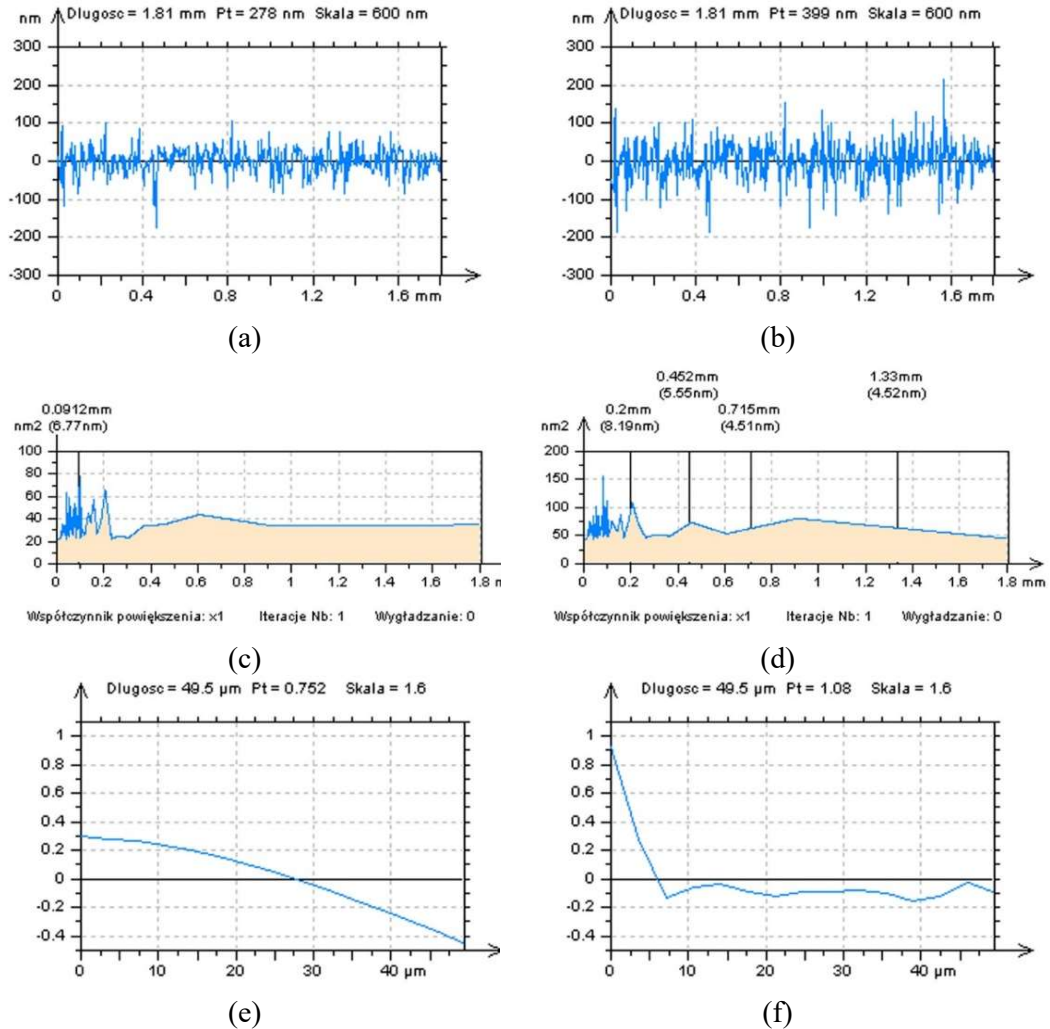
Rysunek 8 przedstawia porównanie częstotliwościowe dwóch powierzchni szumu z zastosowaniem widmowej gęstości mocy. Powierzchnie te zostały uzyskane za pomocą dwóch różnych metod filtracji danych (Gaussa oraz spline) z długością odcięcia równą 10 μm . Dla uzyskanych powierzchni szumu wyodrębniłem profile w kierunku zgodnym z kątem β , następnie wykonałem ich analizę za pomocą funkcji widmowej gęstości mocy oraz funkcji autokorelacji, które przedstawiłem na rysunku 9. Analiza funkcji autokorelacji, w zakresie długości w przedziale 0÷10 μm , wskazał metodę filtracji spline jako bardziej korzystaną do redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego powierzchni teksturowanych [A6, A10].

Autoreferat – Przemysław Podulka



Rysunek 8. Powierzchnie szumu (a, b) oraz ich funkcje widmowej gęstości mocy (c, d) otrzymane po zastosowaniu filtru Gaussa (c) oraz filtru spline (d), *cut-off* = 10 μm , uzyskane z powierzchni po teksturoowaniu laserowym

Autoreferat – Przemysław Podulka



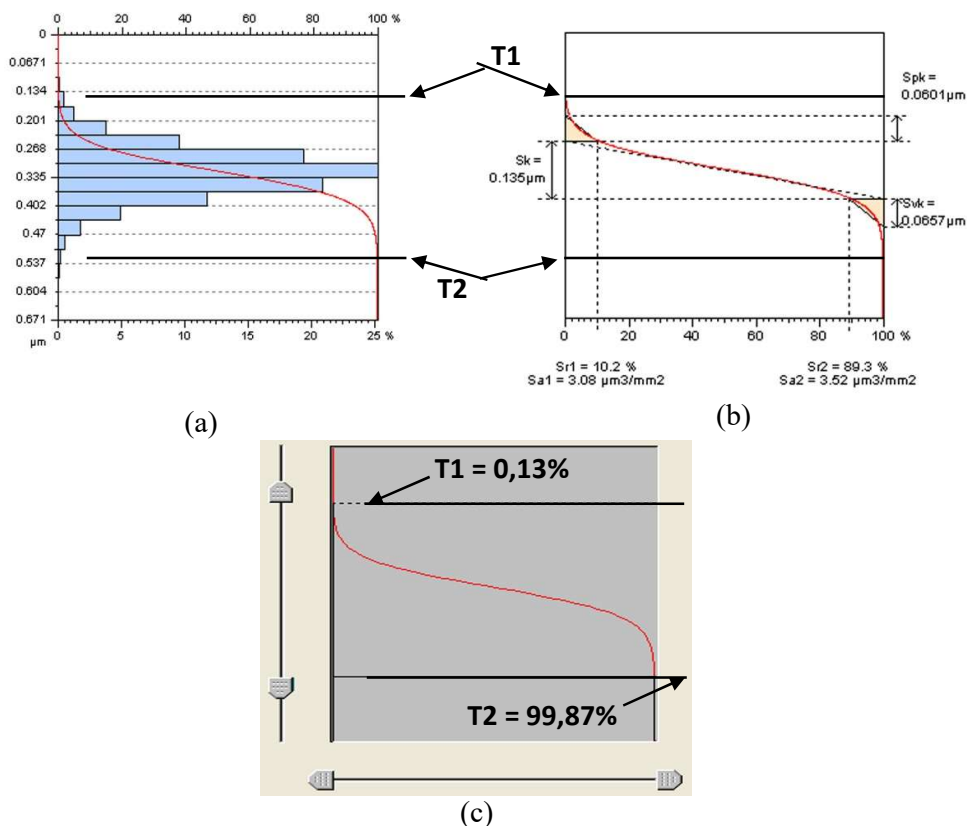
Rysunek 9. Profile wyodrębnione z powierzchni szumu pod kątem β uzyskanej po zastosowaniu filtru Gaussa (a) oraz filtru spline (b), $cut-off = 10 \mu\text{m}$, z powierzchni po teksturuowaniu laserowym, oraz odpowiednio ich funkcje widmowej gęstości mocy (c, d) oraz funkcje autokorelacji (e, f)

4.2.5. Zastosowanie funkcji odcięcia danych

Analizę częstotliwościową powierzchni szumu, będącej residuum procesu filtrowania danych SGP, za pomocą widmowej gęstości mocy, funkcji autokorelacji oraz wykresu kierunku tekstury powierzchni, wzmocniłem algorytmem odcięcia danych (z ang. *thresholding*). Odcięcie danych było w szczególności korzystne przy sprawdzaniu cechy W3 dla powierzchni szumu. Metoda ta posłużyła do sprawdzenia braku występowania wybranych cech powierzchni (wgłębienia, rysy lub inne ślady obróbki powierzchniowej) na otrzymywanej w wyniku filtracji cyfrowej powierzchni szumu wysokoczęstotliwościowego. Z udowodnionego w badaniach założenia W3, powierzchnia szumu nie powinna zawierać cech obróbki powierzchniowej badanej SGP. Wielokrotnie w prowadzonych badaniach [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A12, A13, A17, 27, 29] wskazałem przydatność funkcji odcięcia danych do

Autoreferat – Przemysław Podulka

potwierdzenia dokładności wyboru odpowiedniego sposobu filtracji do redukcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. Odcięcie danych w zakresie 0,13%-99,87% pozwoliło na eliminację części wierzchołkowej (związanej z parametrem zredukowanej wysokości wzniesień S_{pk}) i części dolin (określonej parametrem zredukowanej głębokości wgłębień S_{vk}) oraz analizę w większości opartą na części rdzenia powierzchni (wyznaczonej przez parametr zredukowanej chropowatości rdzenia S_k). Na rysunku 10 przedstawiłem odniesienie wartości odcięcia T1 (0,13%) oraz T2 (99,87%) względem krzywej Abbott'a-Firestone'a oraz krzywej udziału materiałowego.



Rysunek 10. Zastosowanie wartości T1 oraz T2 odcięcia danych w odniesieniu do krzywej Abbott'a-Firestone'a (a), krzywej udziału materiałowego (b) oraz wyznaczenie wartości odcięcia (c)

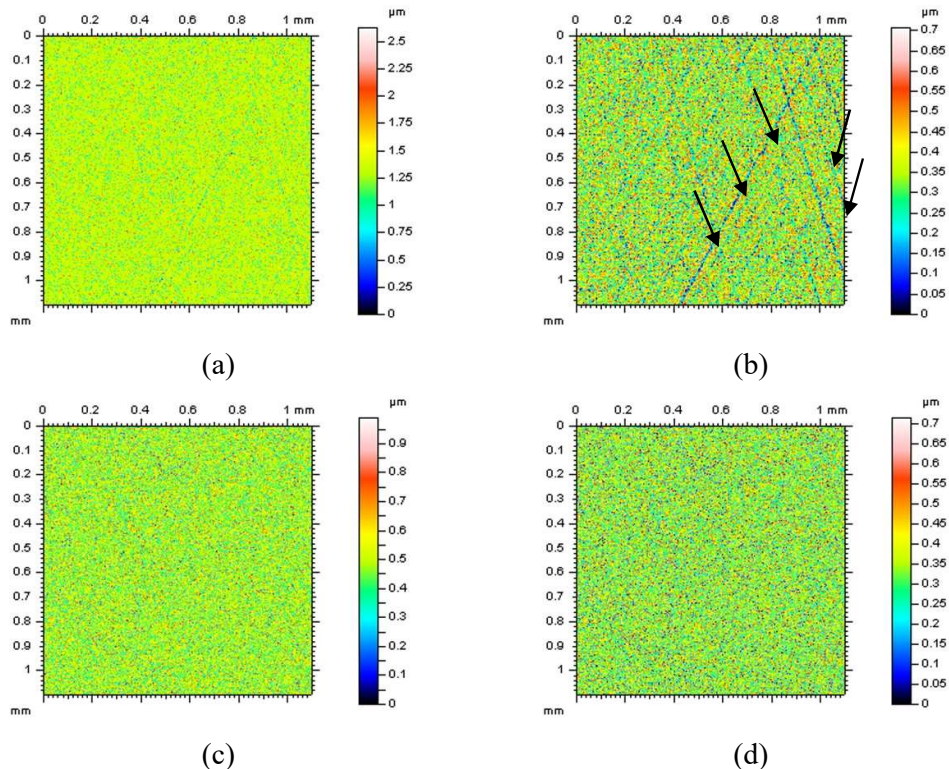
Zastosowanie odcięcia danych T1-T2 pozwoliło na wstępną ocenę wstępowania cech obróbkowych SGP na powierzchni szumu, zgodnie z jej właściwością W3 oraz pośrednio z cechami W1 i W2. Na rysunku 11 przedstawiłem powierzchnie szumu wyznaczone za pomocą dwóch metod filtracji, filtru odpornego Gaussa oraz filtru spline, dla których można porównać powierzchnie zakłóceń po zastosowaniu odcięcia danych T1-T2.

Wybierając odpowiednią metodę filtracji do redukcji wysokoczęstotliwościowych błędów pomiarowych, można wskazać iż dla powierzchni szumu uzyskanej po filtracji odpornej, występują niepożądane cechy obróbkowe, wskazane na rysunku. Wstępną

Autoreferat – Przemysław Podulka

detekcję cech powierzchni szumu nie będących zakłóceniami wysokoczęstotliwościowymi mogłem wykonać dopiero stosując funkcję odcięcia T1-T2.

W celu dalszej weryfikacji wybranej metody filtracji danych stosowałem analizę częstotliwościową za pomocą widmowej gęstości mocy oraz funkcji autokorelacji, kolejno sprawdzając izotropowość danych z wykorzystaniem wykresu kierunku tekstury danych. Dla każdego z rodzajów analizowanych powierzchni badałem wpływ stosowanej metody na wariancje parametrów SGP z normy ISO 25178 [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A12, A15, A17, 24, 25, 27, 28, 29, 30].



Rysunek 11. Powierzchnie szumu wysokoczęstotliwościowego uzyskane z topografii powierzchni kompozytowej po obróbce frezowania z zastosowaniem filtra odpornego (a) oraz filtra spline (c), $cut-off = 10 \mu m$, oraz odpowiednio ich powierzchnie szumu po zastosowaniu odcięcia danych T1-T2 (c,d)

4.2.6. Zaproponowana metodyka badań

Zaproponowana metoda badań obejmowała kilka głównych etapów w analizie uzyskanych danych pomiarowych SGP. Dla badań przeprowadzonych na wynikach pomiaru topografii powierzchni za pomocą interferometru światła białego wykonałem trzystopniowe przygotowanie danych do dalszej analizy za pomocą zaproponowanej metodyki, którego schemat przedstawiłem na rysunku 12.

Wyniki pomiarów SGP uzyskane z wykorzystaniem interferometru światła białego są obarczone kilkoma błędami. Dla lepszej weryfikacji wszystkich działań na wynikach pomiaru zastosowałem poziomowanie. Jest to metoda oparta na wyznaczeniu powierzchni wielomianu stopnia pierwszego obliczonego za pomocą metodą

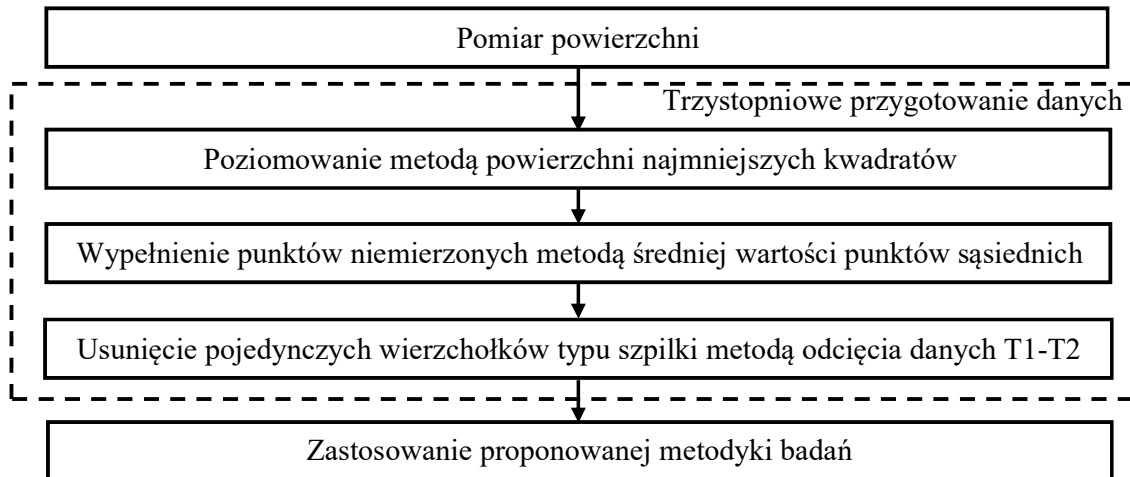
najmniejszych kwadratów. Narzędzie to jest powszechnie stosowane w poziomowaniu danych w dziedzinie metrologii powierzchni jako dedykowana metoda zawarta w oprogramowaniu komercyjnym urządzeń pomiarowych.

Dodatkowo, dla powierzchni o cylindrycznym zarysie kształtu, zastosowałem eliminację zarysu kształtu i falistości SGP za pomocą odpowiednich metod [A10, A11, A12, A13, A15, A16, A17, 24, 27, 28, 29]. Dla większości przypadków zastosowałem wielomiany stopni 2-go, 3-go lub 4-go. Dobór powierzchni odniesienia i uzasadnienie powyższych wyborów były analizowane szeroko w badaniach do doktoratu wnioskodawcy [7, 31, 32, 33] oraz niektóre badania wstępne po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych [A18, 34].

Wyniki pomiaru interferometrem światła białego mogą również zawierać punkty niemierzone [35]. Znając sposoby radzenia sobie z tego typu błędami pomiarowymi [36, 37], uzupełniłem je za pomocą algorytmu wyznaczania wartości średniej z ośmiu sąsiednich punktów.

Błędem związanym z odbiciem światła podczas wykonywania pomiaru są pojedyncze wierzchołki [38, 39, 40], zwana także szpilkami [41, 42]. W celu eliminacji pojedynczych wierzchołków zastosowałem funkcję odcięcia T1-T2, zweryfikowaną do tego typu zakłóceń we wcześniejszych badaniach wnioskodawcy [40, 41].

Po wykonaniu trzech powyżej opisanych kroków wstępnego przetwarzania danych pomiarowych, zastosowałem proponowaną metodykę badań w celu redukcji błędów wysokoczęstotliwościowych pomiaru SGP.



Rysunek 12. Schemat trzystopniowego przygotowania danych pomiarowych do dalszej analizy za pomocą proponowanej metodyki badań

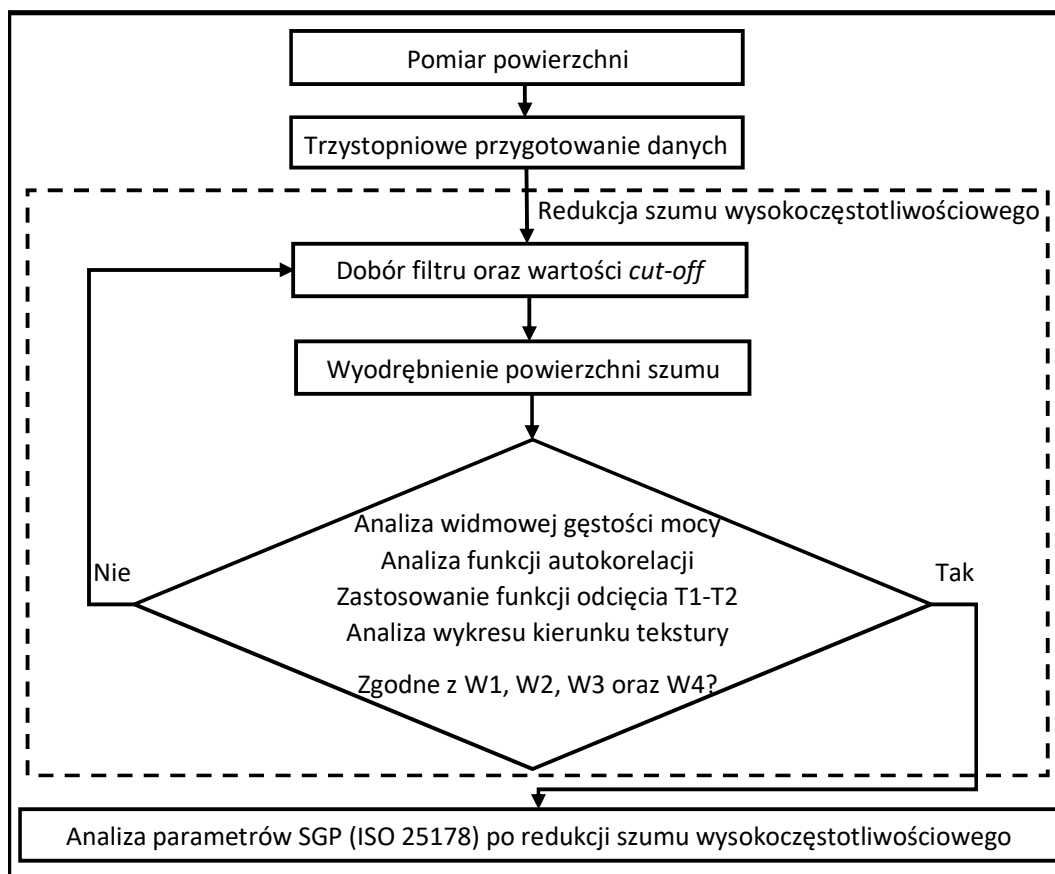
Podstawowym celem proponowanej metodyki badań był dobór odpowiedniej metody filtracji wraz z jej wartością *cut-off* w celu redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru SGP. W tym celu analizowałem powierzchnię szumu, będącą residuum filtracji cyfrowej. Poszukiwałem powierzchni zakłóceń o odpowiednich cechach (w_1 , w_2 , w_3 oraz w_4), które odnosiły się do stopnia

Autoreferat – Przemysław Podulka

przydatności wybranej metody filtracji do redukcji błędów pomiarowych o określonej częstotliwości.

Na rysunku 13 przedstawiłem ogólny schemat proponowanej metodyki badań. Po procesach poziomowania, usunięcia pojedynczych wierzchołków i uzupełnienia punktów niemierzonych, zastosowałem filtr cyfrowy w celu wyodrębnienia powierzchni szumu. W badaniach naukowych skoncentrowałem się na zakłóceniach wysokoczęstotliwościowych, więc powierzchnia zakłóceń była to powierzchnia szumu wysokoczęstotliwościowego. Weryfikacja właściwości powierzchni szumu przewidywała zastosowanie wybranych metod analizy danych, którymi były funkcja autokorelacji, widmowa gęstość mocy, wykres kierunku tekstury powierzchni, jak również dodatkowe zastosowanie funkcji odcięcia danych T1-T2. Jeżeli wszystkie cztery warunki W1, W2, W3 oraz W4, zostały spełnione, metoda filtracji cyfrowej wyznaczająca otrzymaną powierzchnię szumu była klasyfikowana jako odpowiednia do redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru analizowanego rodzaju SGP.

Do wyodrębnienia składowej szumu wysokoczęstotliwościowego zastosowałem filtry cyfrowe, często spotykane w metrologii powierzchni. Pierwszym, szeroko badanym był filtr Gaussa, który w najnowszych wersjach jest zastosowany również jako S-filter [26]. Jest to najczęściej stosowany filtr cyfrowy w pomiarach i analizie SGP, spotykany jeszcze w ostatnich dekadach poprzedniego wieku. Filtr ten poprzez modyfikację funkcji wagi został wzbogacony o odporność na wartości znacznie odbiegające od wartości średnich punktów pomiarowych SGP [39, 46], tworząc tzw. filtr odporny. Filtr odporny regresji Gaussa znalazł również pozytywne zastosowanie min. w wyznaczaniu powierzchni odniesienia SGP dla detali zawierających wgłębienia smarowe [A18, 7, 31], czy też cechy po obróbce powierzchniowej o określonych rozmiarach (szerokości lub głębokości [34, 43, 44, 45]).



Rysunek 13. Schemat ogólny zastosowanej metodyki badań

Oprócz filtrów Gaussowskich, popularne w analizie SGP są filtry sklejące, tzw. filtry spline [A12, 8], oraz filtry morfologiczne [6, 47, 48]. W badaniach zastosowałem również filtr transformaty Fouriera, popularny w opisie wielu właściwości SGP [A16, 49, 50]. Dodatkowo, badałem wyniki uzyskane z kilku innych filtrów uśredniających, takich jak filtr medianowy ‘de-noising’, filtr medianowy wygładzający oraz filtr średniej ruchomej. Tabela 1 zawiera opis oznaczenia zastosowanych w badaniach filtrów cyfrowych. Z kolei tabela 2 zawiera oznaczenie zastosowanych w metodyce funkcji analizy danych, zgodnie z nazwami i skrótami w publikacjach A1-A18.

Wszystkie te filtry są dedykowane w oprogramowaniu komercyjnym urządzeń służących do pomiaru SGP. Wybór filtrów badanych za pomocą proponowanej metodyki podyktowany był ich przeznaczeniem (szerokie zastosowanie w metrologii powierzchni) oraz dostępnością (oprogramowanie urządzeń pomiarowych szeroko dostępne dla badaczy).

Autoreferat – Przemysław Podulka

Tabela 1. Zestawienie oraz oznaczenie stosowanych w badaniach metod filtracji cyfrowej

Rodzaj filtru	Nazwa w języku angielskim	Oznaczenie w publikacjach
Filtr regresji Gaussa	Gaussian Regression Filter, S-filter	GRF
Filtr odporny regresji Gaussa	Robust Gaussian Regression Filter	RGRF
Filtr sklejanya (filtr spline)	Spline Filter	SF
Filtr morfologiczny	Morphological Filter Morphological Opening-Closing Filter	MOF MOCF
Filtr transformaty Fouriera	Fast Fourier Transform Filter	FFTF
Filtr medianowy ‘de-noising’	Median Denoising Filter	MDF
Filtr medianowy wygładzający	Median Smoothing Filter	MSF
Filtr średniej ruchomej	Moving Average Filter	MAF

Tabela 2. Zestawienie oraz oznaczenie stosowanych w badaniach funkcji do analizy danych

Nazwa funkcji	Nazwa funkcji w języku angielskim	Oznaczenie w publikacjach
Funkcja autokorelacji	Autocorrelation Function	ACF
Widmowa gęstość mocy	Power Spectrum Density	PSD
Wykres kierunku tekstury	Texture Direction	TD
Narzędzie odcięcia danych	Thresholding Method	TRESH
Profil wyodrębniony zgodnie z kierunkiem obróbki	Treatment Trace Profile	TTP
Część powierzchni nie zawierające wgłębień smarowych	Out-of-dimple, out-of-feature, free-of-dimple	OOD, OOF, FOD

Podstawowym celem przeprowadzonych badań było wskazanie alternatywnej metodyki redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru SGP ze szczególnym wskazaniem błędów powstałych w wyniku złego doboru metody wyodrębnienia tego typu zakłóceń. W przeprowadzonych badaniach analizowałem wpływ poszczególnych filtrów cyfrowych na efekty redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego. Zastosowanie proponowanej metodyki pozwoliło na dobór odpowiedniego filtru oraz jego wartości odcięcia (*cut-off*) w zależności od rodzaju badanej powierzchni. Zestawienie metod filtracji, wraz z ich wartością *cut-off*,

Autoreferat – Przemysław Podulka

pozwalających na minimalizację błędów przy usuwaniu zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z wyników pomiaru SGP, przedstawiłem w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki doboru metody filtracji cyfrowej oraz jej wartości *cut-off* dla redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego uwzględniając różne rodzaje topografii powierzchni

Rodzaj topografii oraz wykonanej obróbki powierzchniowej	Rodzaj filtru oraz wartość <i>cut-off</i>	Publikacje zawierające badania określonych rodzajów SGP
SGP cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym	FFTF 15 μm ÷ 25 μm	A7, A14, A15, A16, 27
SGP cylindra po honowaniu i wygniataniu kieszeni olejowych	FFTF 25 μm	A14, A15, A16, A17, 27, 28
SGP płaszczy tłoków po toczeniu	SF 25 μm	A9, A11, A12, A13, A15, 15, 24, 27, 29, 30
SGP po szlifowaniu	MOF 25 μm	A11, A12, A13, A15, 27, 28, 29
SGP tytanu po szlifowaniu	MDF 10 μm	A1
SGP izotropowych	FFTF, SF 15 μm	A12, A13, A15, A17
SGP po frezowaniu	MDF 15 μm ÷ 25 μm	A11, A12, A13, 27, 28, 29
SGP po teksturowaniu laserowym	SF 15 μm	A6, A10, A11, A12, A13, 27, 28, 29
SGP kompozytowych po toczeniu	RGRF 10 μm	A9
SGP kompozytowych po honowaniu	SF 7.5 μm	A7
SGP kompozytowych po frezowaniu	SF 7.5 μm	A7
SGP kompozytowych po szlifowaniu diamentowym	SF 7.5 μm	A7
SGP ceramicznych po honowaniu	SF 7.5 μm	A7
SGP ceramicznych po frezowaniu	SF 7.5 μm	A7
SGP ceramicznych po szlifowaniu diamentowym	SF 7.5 μm	A7
SGP zgrzewanych wybuchowo po badaniach zmęczeniowych	GRF (S-filter) 8 μm	A8
SGP stali niskostopowych po badaniach zmęczeniowych	MOF 2.5 μm	A5
SGP stopów aluminiowych po badaniach zginania zmęczeniowego	SF 2.5 μm	A4

Autoreferat – Przemysław Podulka

SGP po procesie wytrawiania	SF 10 μm	A3
SGP stopów drukowanych po procesie śrutowania	MDF 10 μm	A2

Wybrany rodzaj filtru cyfrowego oraz wartość jego *cut-off* może być sugerowana do redukcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z wyników pomiaru wyszczególnionego rodzaju SGP. We wnioskach wszystkich publikacji naukowych podkreślałem jednak, iż wskazane za pomocą proponowanej metodyki badań metody filtracji cyfrowej zostały porównane z określonej grupy filtrów cyfrowych, zgodnie ze wcześniej wspomnianym sposobem ich doboru. Pokreśliłem również, iż podstawową propozycją jest metodyka doboru rodzaju filtru oraz jego *cut-off*. Nie ogranicza ona możliwości porównania innych rodzajów filtrów cyfrowych, dopasowanych do innych rodzajów topografii powierzchni.

Podstawowym założeniem ciągu wykonanych badań naukowych było zaproponowanie metodyki doboru rodzaju filtru oraz jego długości odcięcia, który byłby alternatywą do międzynarodowej metody uśredniania wyników powtarzanych (co najmniej trzykrotnie) pomiarów SGP. Przeprowadzenie badań dla wielu rodzajów powierzchni pozwoliło zweryfikować pozytywnie przydatność wskazanej metodyki do redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru SGP. Zastosowanie zaproponowanej metodyki zawierającej wybrane funkcje analizy danych pomiarowych ułatwia redukcję błędów pomiaru SGP z uwzględnieniem szumu wysokoczęstotliwościowego, który jest wynikiem wibracji systemu pomiarowego. Dostępność proponowanych w metodyce badań funkcji oraz filtrów cyfrowych jest kolejnym argumentem dla ułatwienia pracy użytkownika korzystającego z prezentowanych metod analizy SGP.

4.2.7. Walidacja zaproponowanej metodyki

Zgodnie z międzynarodowymi standardami ISO 25178 (część 600 oraz 700), w procesie wyznaczania szumu pomiarowego oznaczonego jako N_M (z ang. *noise measurement*), otrzymana wysokość szumu jest zależna od wartości Sq (średniego kwadratowego odchylenia powierzchni). Zgodnie z standardem ISO, Szum pomiarowy N_M jest wyznaczony za pomocą następującej zależności [17, 18]:

$$N_M = \sqrt{\frac{\sum_i^n Sq^2(z_i(x, y) - z_{mean}(x, y))}{n - 1}}$$

gdzie z_{mean} jest to średnia wartość rzędnych wysokości z przy n -powtórzeniach pomiaru SGP.

Przy wszystkich przeprowadzanych badaniach i analizach, ilość powtórzeń pomiaru SGP wynosiła 3 ($n = 3$). Wyniki uzyskane po zastosowaniu wskazanej przez metodykę filtracji cyfrowej były następnie porównywane z wynikami szumu wyznaczonego przez standardy ISO. Korelację analizowałem także dla parametrów SGP

Autoreferat – Przemysław Podulka

w normy ISO 25178 ze szczególnym uwzględnieniem tych parametrów, które są najbardziej czułe na występowanie zakłóceń wysokoczęstotliwościowych.

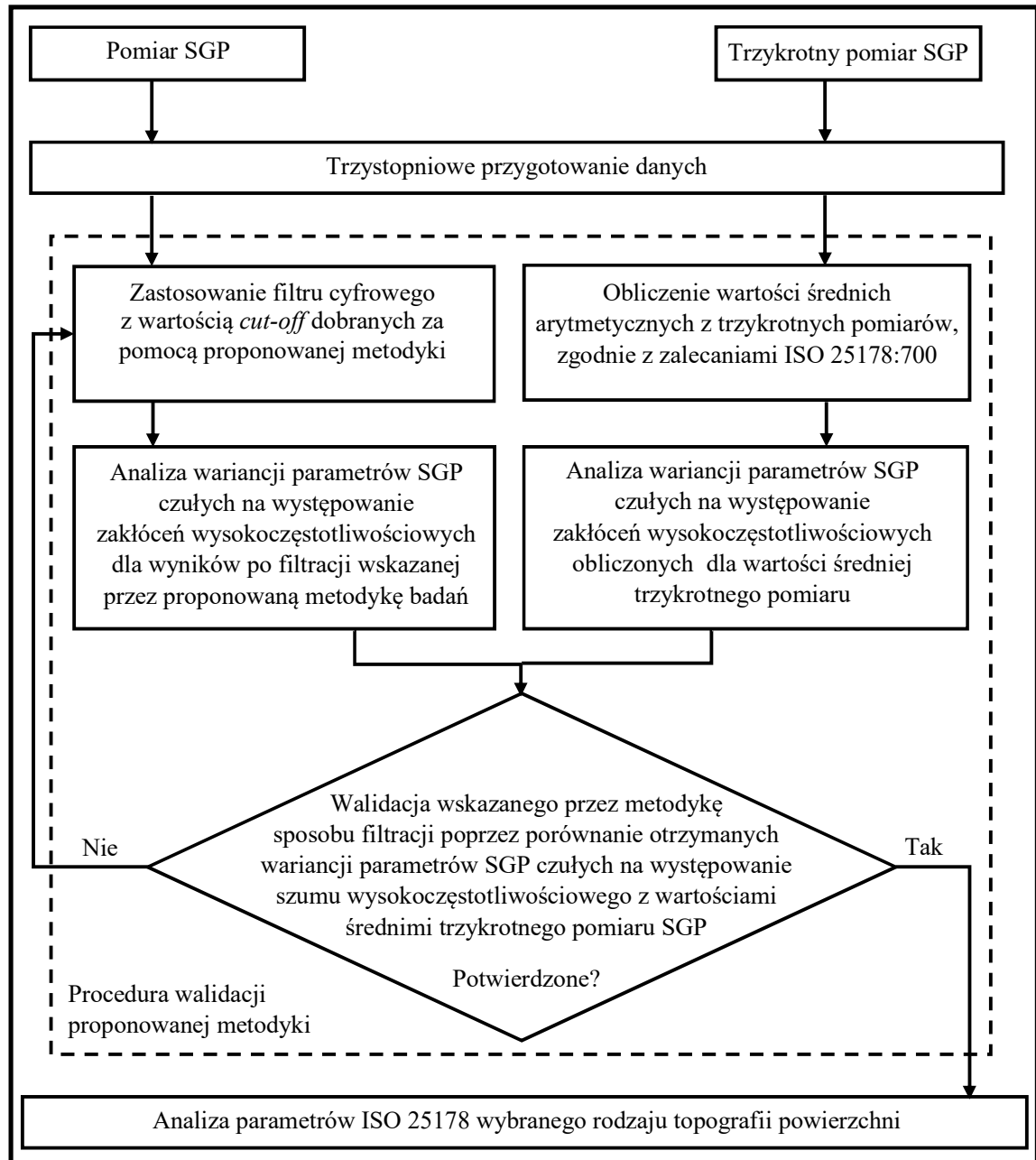
Do parametrów SGP czułych na występowanie szumu wysokoczęstotliwościowego zaliczyłem:

- parametry hybrydowe:
Sdq – średnia kwadratowa pochylenia powierzchni (z ang. *root mean square gradient*),
Sdr – względna zmiana pola powierzchni wzniesień w porównaniu do płaszczyzny idealnej (z ang. *developed interfacial area ratio*);
- parametry cech:
Spc – średnia arytmetyczna krzywizna szczytów powierzchni (z ang. *arithmetic mean peak curvature*),
Spd – gęstość szczytów powierzchni (z ang. *density of peaks*);

oraz w określonych przypadkach znacznym zmianom ulegały wartości:

- parametry funkcyjne:
Smr – udział materiałowy powierzchni na określonej wysokości (z ang. *areal material ratio*),
Smc – odwrócony udział materiałowy powierzchni (z ang. *inverse areal material ratio*),
Sk – wysokość chropowatości rdzenia powierzchni (z ang. *core roughness depth*).

Na rysunku 14 przedstawiłem procedurę walidacji wskazanego przez proponowaną metodykę badań sposobu filtracji cyfrowej (wraz z wyborem wartości *cut-off*) w odniesieniu do redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru SGP.



Rysunek 14. Schemat ogólny procedury walidacji proponowanej metodyki badań

Wariancje niektórych parametrów czułych na zakłócenia wysokoczęstotliwościowe wynosiły ponad 100% dla wybranych rodzajów powierzchni [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A12, A15, A16]. Dlatego też tzw. parametry czułe na szum wysokoczęstotliwościowy były najszerzej analizowane przy doborze odpowiedniej metody filtracji cyfrowej danych, stosowanej do redukcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. W tabeli 4 przedstawiłem średnie arytmetyczne wartości odchylenia standardowego parametrów czułych na zakłócenia wysokoczęstotliwościowe wyznaczone między wynikami filtracji wybranymi algorytmami cyfrowymi z *cut-off* równym 10 μm a wartościami średnimi trzykrotnego pomiaru SGP stopu LPBF Inconel 718 po trzech różnych rodzajach obróbki powierzchniowej.

Autoreferat – Przemysław Podulka

Tabela 4. Średnie arytmetyczne wartości odchylenia standardowego parametrów czułych na występowanie szumu wysokoczęstotliwościowego, obliczonych między wartością uzyskaną po zastosowaniu wybranej filtracji cyfrowej a wartością średnią trzech powtórzeń pomiaru SGP (opracowane na podstawie publikacji A2).

ISO 25178	GF	RGRF	SF	MOF	MDF	FFTF
Stop LPBF Inconel 718 po początkowym stadium obróbki						
<i>Sdq</i>	32,38	27,48	12,38	26,49	7,42	42,64
<i>Sdr</i> , %	40,41	31,45	11,15	22,12	5,17	32,56
<i>Spd</i> , 1/mm ²	54,39	41,37	16,44	29,09	12,37	45,04
Stop LPBF Inconel 718 po procesie kulowania						
<i>Sdq</i>	28,36	21,47	18,14	33,11	6,62	39,45
<i>Sdr</i> , %	41,18	28,05	16,55	27,44	3,16	31,39
<i>Spd</i> , 1/mm ²	50,55	38,51	21,09	36,21	8,48	49,04
Stop LPBF Inconel 718 po procesie kulowania ultradźwiękowego						
<i>Sdq</i>	38,5	32,5	16,5	26,56	4,57	38,52
<i>Sdr</i> , %	46,5	38,0	10,0	20,52	6,15	30,56
<i>Spd</i> , 1/mm ²	59,0	47,5	18,5	28,43	9,48	43,46

Minimalne różnice między wybranym przez metodykę rodzajem filtru z określoną wartością *cut-off* a wartością średnią uzyskaną z powtórzonego trzykrotnie pomiaru (zgodnie z ISO 25178:700) uzyskałem przy stosowania metody filtracji MDF, która została wcześniej wskazana poprzez analizę powierzchni szumu za pomocą funkcji autokorelacji, widmowej gęstości mocy oraz kierunku tekstury powierzchni [A2].

Klasyfikując wybrany filtr cyfrowy jako odpowiedni do redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości z wyników pomiaru SGP założyłem iż powinien on mieć największy wpływ na parametry najbardziej czułe na ten rodzaj błędów pomiarowych, a mniejszy na pozostałe parametry z normy ISO 25178.

Zgodnie z powyższym, filtr MDF powodował dla pozostałych parametrów SGP zmiany mniejsze niż 2%, dla niektórych parametrów amplitudowych lub z grupy krzywej udziału materiałowego (grupa *Sk*) wariacje wynosiły do 5%. Dla tego rodzaju SGP (stop LPBF Inconel 718 po trzech różnych rodzajach obróbki) wpływ szumu pomiarowego o wysokiej częstotliwości powodował wariacje wartości parametrów tekstury powierzchni ISO 25178 czuły na zakłócenia wysokoczęstotliwościowe do 60%.

Walidację parametryczną zaproponowanej metodyki badań opartej na zastosowaniu funkcji autokorelacji, widmowej gęstości mocy, wykresu tekstury powierzchni oraz funkcji odcięcia danych T1-T2 do weryfikacji właściwości W1, W2, W3 oraz W4 zdefiniowanej powierzchni szumu wysokoczęstotliwościowego potwierdziłem dla wielu różnych rodzajów topografii powierzchni [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9].

Dodatkowo w publikacji A4 wyniki uzyskane poprzez pomiar bezstykowy porównałem do wyników wykonanych urządzeniem stykowym, potwierdzając poprawność proponowanej metodyki badań.

4.3. Zestawienie wykonanych badań naukowych

W podjętym zagadnieniu „Redukcja błędów pomiaru i analizy struktury geometrycznej powierzchni” wykonałem następujące badania naukowe, uwzględniając każdy artykuł z wykazu ciągu publikacji z osobna:

W publikacji **A1** uwzględniłem analizę proponowanej metody redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości z wyników pomiaru topografii dla materiałów trudnoobrabialnych (tytanowych) po różnym rodzaju obróbki powierzchniowej. Analizie poddałem osiem rodzajów powierzchni. Wyniki uzyskane po zastosowaniu proponowanej metodologii, służącej do wyboru filtra cyfrowego w celu redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości, porównałem z wynikami obliczenia szumu pomiarowego zgodnego z ISO 25178 części 600 oraz 700, określonego jako N_M . Uzyskane rezultaty potwierdziły przydatność proponowanej procedury do analizy zakłóceń wysokoczęstotliwościowych, opartej na zastosowaniu czterech funkcji analizy danych pomiarowych: funkcji widmowej gęstości mocy, funkcji autokorelacji, funkcji kierunku tekstury powierzchni oraz funkcji odcięcia danych. Porównując uzyskane rezultaty do wyników określania szumu za pomocą standardów międzynarodowych N_M potwierdziłem słuszność kolejności wykonywanych w dobranej procedurze działań. Wskazany zgodnie z procedurą filtr cyfrowy minimalizował w stopniu największym (spośród badanych metod filtracji) błędy spowodowane przez proces usuwania zakłóceń o wysokiej częstotliwości z wyników pomiaru topografii materiałów Ti-6Al-4V po różnych rodzajach obróbki powierzchniowej.

W publikacji **A2** analizowałem topografię stopu LPBF Inconel 718 po trzech różnych rodzajach obróbki powierzchniowej. Wyniki zastosowania proponowanej metodologii detekcji szumu wysokoczęstotliwościowego oraz doboru sposobu filtracji i jego długości odcięcia uwzględniały analizę topografii powierzchni po trzech różnych procesach kulowania. Przedstawiona metoda opierała się na zastosowaniu jednocześnie czterech funkcji przetwarzania danych, tj. funkcji autokorelacji, funkcji widmowej gęstości mocy, funkcji kierunku tekstury powierzchni oraz funkcji odcięcia danych TRESH. Odpowiednie zestawienie wraz z doбором kolejności analizy zgodnym z proponowaną procedurą, pozwalało na odpowiednią detekcję oraz walidację wyselekcjonowanego filtra wraz z jego długością odcięcia *cut-off*. Po wykonaniu odcięcia danych 0,13% - 99,87%, dla otrzymanej w procesie dekompozycji danych za pomocą filtracji cyfrowej powierzchni szumu, analizowałem wybrane obszary oraz profile za pomocą funkcji autokorelacji, funkcji widmowej gęstości mocy oraz funkcji kierunku tekstury powierzchni, wskazując filtr powodujący najmniejsze błędy podczas usuwania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. Wyniki skontrastowałem z metodą zawartą w międzynarodowym standardzie, opartą na ocenie wartości średniej powtórzonych wyników pomiaru topografii powierzchni. Zastosowanie proponowanej metodologii pozwoliło na wskazanie filtra oraz jego wartości odcięcia *cut-off*, powodującego najmniejsze zniekształcenia parametrów tekstury powierzchni z normy ISO 25178,

Autoreferat – Przemysław Podulka

porównując wyniki powszechnie stosowanego metrologii powierzchni filtru Gaussa z kilkoma alternatywnymi filtrami danych.

W publikacji **A3** zaproponowałem procedurę wykrywania i usuwania zakłóceń o wysokiej częstotliwości z wyników bezstykowego pomiaru topografii powierzchni materiałów po różnych rodzajach trawienia powierzchniowego. W artykule dokładnie przeanalizowałem wyniki redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru SGP za pomocą regularnego izotropowego filtru Gaussa, oznaczonego również w oprogramowaniu komercyjnym oraz wielu pozycjach literatury jako S-filter. Zwróciłem szczególną uwagę na błędy jakie może powodować nieodpowiednie stosowanie filtracji cyfrowej w minimalizacji zakłóceń o wysokiej częstotliwości, uwzględniając powszechnie stosowany w metrologii powierzchni filtr Gaussa. Wobec zaproponowanej metodologii doboru filtru oraz jego długości odcięcia *cut-off*, zbadałem alternatywne metody filtracji, zgodnie z oznaczeniem w tabeli 1. Wobec braku śladów obróbki maszynowej badanych materiałów, detekcję szumu wysokoczęstotliwościowego oparłem na cechach nieregularnych powierzchni, które nie miały określonego kierunku dominującego. W przypadku tego rodzaju powierzchni, wyodrębnienie profili w obranym kierunku dominującym jest niemożliwe. Wobec czego zaprezentowałem metody wspomagające detekcję zakłóceń o wysokiej częstotliwości, uwzględniając wyodrębnienie profili z powierzchni przy jednoczesnym wspomaganie przez funkcję odcięcia danych TRESH. Jak w większości przeprowadzonych analiz własnych oraz wyników literaturowych, walidację zaproponowanej metodyki wykonałem w odniesieniu do standardowej metody uśredniania powtórzonych pomiarów, zgodnie z normą ISO 25178, część 600 oraz część 700.

W publikacji **A4** podjąłem temat analizy topografii powierzchni stopu aluminiowego 6082 po badaniach zginania zmęczeniowego. Pomiary SGP wykonano za pomocą mikroskopu różnicowania ogniskowego Alicona IF G5. Dla analizowanych obszarów powierzchni określono trzy strefy: strefę inicjacji pęknięcia, strefę złomu doraźnego próbki, oraz strefę tzw. propagacji, która znajduje się pomiędzy dwoma poprzednimi strefami. W porównaniu do badań wykonanych w artykule A5, zwróciłem uwagę na wpływ określenia strefy granicznej na działania związane z wykrywaniem oraz redukcją szumu wysokoczęstotliwościowego. Zaproponowałem także wyodrębnienie profili z powierzchni w czterech położeniach: w obszarze inicjacji pęknięcia, w obszarze propagacji, w obszarze złomu doraźnego próbki oraz w obszarze gdzie nie występowały żadne pęknięcia spowodowane badaniami zmęczeniowymi. Określenie czwartego obszaru pozwoliło na stabilizację wysokości wyodrębnianych profili przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności detekcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości. Różne amplitudy wysokości wyodrębnianych profili z analizowanej powierzchni pozwoliły na bardziej dokładne określenie występowania szumu wysokoczęstotliwościowego w wynikach pomiaru SGP stopu aluminiowego 6082 po badaniach zginania zmęczeniowego.

W publikacji **A5** skoncentrowałem się na wysokoczęstotliwościowych zakłóceniach pomiarowych topografii powierzchni przelomów zmęczeniowych stali niskostopowej,

Autoreferat – Przemysław Podulka

odpornej na korozję, poddanej zginaniu ze skręcaniem. Sposoby wykrywania występowania zakłóceń o wysokiej częstotliwości z wyników pomiaru SGP uzależniłem od miejsca wyodrębnienia analizowanego obszaru powierzchni. Wyszczególniając miejsca propagacji pęknięcia oraz zerwania się próbki, wskazałem wpływ różnorodności wyodrębnionego obszaru na dokładność wykrywania szumu wysokoczęstotliwościowego. Dokładniejsze określenie zakłóceń o wysokiej częstotliwości pozwala na lepszy dobór filtra (oraz jego długości odcięcia *cut-off*) do redukcji szumu o określonej częstotliwości. Wskazałem znacznie podziału wszystkich działań służących minimalizacji zakłóceń o wysokiej częstotliwości, detekcji oraz filtracji, na finalne wyniki całego procesu redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego. Zwróciłem uwagę na znaczenie odpowiedniego wykrywania zaszumienia wyników pomiaru SGP w doborze metody redukcji szumu o wysokiej częstotliwości. W artykule uwidocznilem także wpływ dokładności analizy strefy przejścia między dwoma wspomnianymi obszarami przelomu zmęczeniowego próbki poddanej cyklicznemu zginaniu ze skręcaniem. Podczas walidacji proponowanej metodologii badań, wyniki zostały potwierdzone wykonaniem pomiarów na urządzeniu bezstykowym oraz urządzeniu stykowym.

W publikacji A6 przeanalizowałem wpływ proponowanej metodologii wykrywania oraz redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego na ocenę właściwości powierzchni po teksturuwaniu laserowym. Szczegółowej analizie poddałem kąt α zawarty między kierunkami teksturuwania. Analizując topografię dla powierzchni oraz wybrane profile powierzchni uwidocznilem wpływ kierunku ich wyodrębniania na dokładność oceny występowania szumu o wysokiej częstotliwości. Wyodrębnienie profili pod kątem α pozwoliło również na ocenę przydatności wybranego sposobu filtracji cyfrowej analizowanych danych pod względem minimalizacji wpływu zakłóceń wysokoczęstotliwościowych na finalne wyniki pomiaru SGP. Zwróciłem również uwagę na wyodrębnienie najgłębszych położenia profili, czyli odpowiednie przecięcie analizowanej powierzchni, tak aby uzyskać wartości profili o jak najmniejszej amplitudzie. Minimalizacja maksymalnej wysokości wyodrębnianego profilu ma wpływ na dokładność oceny występowania szumu o wysokiej częstotliwości za pomocą funkcji autokorelacji oraz funkcji widmowej gęstości mocy. Najważniejszym osiągnięciem we wspomnianym artykule jest zmniejszenie błędów spowodowanych nieprawidłowym doбором filtra oraz jego długości odcięcia *cut-off* poprzez wybór miejsca wyodrębnienia profilu.

W publikacji A7 przeprowadziłem analizę wpływu zakłóceń o wysokiej częstotliwości na wyniki pomiaru topografii powierzchni materiałów kompozytowych i ceramicznych po różnych rodzajach obróbki powierzchniowej. Określając metodę detekcji oraz redukcji zakłóceń pomiarowych o wysokiej częstotliwości, w szczególności brałem pod uwagę kierunek tekstury mierzonej topografii powierzchni. Zaproponowałem wyodrębnienie profili powierzchni w miejscach występowania śladów obróbki o określonych wartościach rzędnej wysokości. Analizowałem profile rys położonych w największej głębokości badanego wycinka powierzchni przy jednocześnie najmniejszej wysokości

Autoreferat – Przemysław Podulka

względnej tejże rysy. Podobną analizę zastosowałem dla pozostałych cech powierzchni branych pod uwagę przy wykrywaniu oraz redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego. Jako najważniejszy ze spostrzeżeń odnotowałem, iż analiza cech powierzchni o najmniejszej wysokości tychże cech, przy jednoczesnym odpowiednim ich wyodrębnieniu, pozwala na bardziej dokładne określenie występowania zakłóceń o wybranej częstotliwości. Odpowiedni wybór wyodrębnianych cech powierzchni ma także znaczenie przy wyborze odpowiedniej, minimalizującej błędy przetwarzania danych, filtracji oraz długości jej odcięcia *cut-off*. Jednocześnie, uwzględniając odpowiednią dokładność oceny wybranych cech powierzchni podczas ich wyodrębnienia, minimalizuje się wpływ zakłóceń o wysokiej częstotliwości na określenie parametrów SGP z normy ISO 25178.

W publikacji **A8** uwzględniłem szeroką analizę topografii powierzchni przełomów zmęczeniowych próbek po badaniach zmęczeniowych na zginanie z uwzględnieniem błędów pomiaru SGP. Szum o wysokiej częstotliwości analizowałem dla wyników pomiaru dwoma urządzeniami: mikroskopem różnicowania ogniskowego (z ang. *Focus Variation Microscope*, FVM) Alicona IF G5 oraz profilmetrem optycznym Sensofar 3D (S-Neox). Różnice w wynikach pomiarów uzyskanych na obu urządzeniach posłużyły do analizy topografii powierzchni po badaniach zmęczeniowych z uwzględnieniem szumu o wysokiej częstotliwości. Zauważyłem, iż różnice w pomiarze różnymi urządzeniami i metodami mogą posłużyć do oceny wielkości występowania zakłóceń pomiarowych o określonej częstotliwości. Przeprowadzenie badań do powyżej wspomnianego artykułu uwidocznilo znaczny wpływ szumu wysokoczęstotliwościowego na wybrane parametry chropowatości powierzchni uzyskane różnymi urządzeniami pomiarowymi. Dodatkowo odnotowałem, iż dokładna analiza różnic w wynikach pomiarów SGP różnymi urządzeniami może posłużyć do zdefiniowania amplitudy zakłóceń pomiarowych o wybranej częstotliwości.

W publikacji **A9** szczegółowo przeanalizowałem wpływ występowania szumu pomiarowego o wysokiej częstotliwości na kształt funkcji autokorelacji. Za przykład wzięłem powierzchnie kompozytowe po procesie toczenia. Korzyści dokładnej analizy kształtu funkcji autokorelacji odniosłem do ograniczeń metody opartej na analizie samej funkcji widmowej gęstości mocy. Uwidocznilem błędy występujące podczas analizy szumu wysokoczęstotliwościowego danych pomiarowych SGP tylko za pomocą widmowej gęstości mocy. Badania oparte na analizie kształtu funkcji autokorelacji potwierdziłem stosując dodatkowo funkcję odcięcia danych TRESH. Pozwoliło to na dokładniejszą analizę powierzchni szumu pod względem kierunku tekstury. Porównanie kierunku dominującego dla danych powierzchni szumu z kierunkiem przeprowadzonej obróbki powierzchniowej, w tym przypadku toczenia, pozwalało na określenie występowania (lub jego braku) cech powierzchni które nie powinny być eliminowane z danych mierzonych topografii powierzchni. Analiza funkcji autokorelacji po zastosowaniu funkcji odcięcia TRESH dla danych powierzchni szumu potwierdziła przydatność analizy kształtu tej funkcji w określaniu dokładności usuwania zakłóceń o wysokiej częstotliwości z wyników pomiaru SGP za pomocą wybranej metody filtracji.

Autoreferat – Przemysław Podulka

W praktyce, wybór filtra wraz z jego długością odcięcia określiłem jako adekwatny po zastosowaniu proponowanej metodologii opartej na analizie kształtu funkcji autokorelacji.

W publikacji **A10** przedstawiłem korzyści stosowania funkcji odcięcia danych w analizie zakłóceń o wysokiej częstotliwości wyników pomiaru SGP po teksturuowaniu laserowym. Samo zastosowanie funkcji autokorelacji, funkcji widmowej gęstości mocy oraz funkcji kierunku tekstury powierzchni nie przyniosło korzyści dla procesu detekcji występowania tego typu błędów pomiarowych. Ten rodzaj powierzchni cechuje się względnie dużą liczbą wgłębień oraz wzniosów względem danego obszaru analizy, co powoduje proces wykrywania szumu wysokoczęstotliwościowego bardziej skomplikowanym w odniesieniu do innych, analizowanych wcześniej rodzajów topografii powierzchni. Zastosowanie metody kierunkowego wyodrębnienia wybranych profili powierzchni również nie pozwalało na jednoznaczną ocenę występowania zakłóceń pomiarowych o wysokiej częstotliwości danych. Dlatego też odpowiednie zastosowanie funkcji odcięcia danych, przy jednoczesnym określeniu wartości odcięcia (różniącej się od wartości T1-T2), pozwalało na zmniejszenie amplitudy danych pomiarowych powierzchni przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności określenia występowania zakłóceń o wysokiej częstotliwości w wynikach pomiaru SGP po teksturuowaniu laserowym.

W publikacji **A11** do stosowanych w proponowanej metodyce funkcji analizy danych pomiarowych SGP dołączyłem funkcję widma częstotliwości (z ang. *frequency spectrum*). Dla szeregu przeprowadzonych analiz, w których detekcja zakłóceń wysokoczęstotliwościowych była utrudniona z wykorzystaniem dwóch technik, tj. funkcji autokorelacji oraz widmowej gęstości mocy, zastosowanie funkcji widma częstotliwości pozwalała doprecyzować to działanie. W tym artykule także uwidocznilem błędy w analizie danych pomiarowych SGP, uwzględniając wykrywanie oraz redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości, spowodowane selektywnym stosowaniem tylko wybranych funkcji. Przy analizie powierzchni wskazałem korzyści prawidłowego wyboru kierunku (założenie TDM, z ang. *treatment direction method*) oraz miejsca (założenie OOD, z ang. *out-of-dimple*) wyodrębnienia profili (2D) w celu zwiększenia precyzji wykrywania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych, porównując je jednocześnie z analizą jedynie danych powierzchni (3D). Zwróciłem także szczególną uwagę aby nie koncentrować się na jednej wartości *cut-off* dla wszystkich analizowanych rodzajów topografii powierzchni, ale dopasowywać metody filtracji oraz ich wartość odcięcia do rodzaju SGP.

W publikacji **A12** porównałem stosowanie różnych filtrów sklepanych (z ang. *spline*) w detekcji i redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości z ośmiu SGP po różnych rodzajach obróbki powierzchniowej. Wykonując analizę powierzchniową oraz profilową, zwróciłem szczególną uwagę na obszary powierzchni nie zawierające cechy obróbki (wgłębień smarowych, rys), które po raz pierwszy w badaniach określiłem jako z ang. *out-of-feature*. Dla analizy profilowej zaprezentowałem metodę poziomowego sklepania

profilu polegającą na wyodrębnieniu z profilu części nie zawierających śladów obróbki i połączeniu ich ze sobą. W odróżnieniu od standardowej metody odcięcia danych T1-T2, pozwalało to na zmniejszenie wpływu usunięcia niektórych płytszych rys (oraz innych śladów obróbki) podczas eliminacji wgłębień smarowych z danych poddawanych dalszej detekcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości. Określiłem również dla szerokości oraz ilości (gęstości) cech (śladów) obróbki, wartości progowe do których wskazanie występowania danych o wysokiej częstotliwości spośród danych pomiarowych jest ułatwione z zastosowaniem funkcji autokorelacji oraz widmowej gęstości mocy. Ostatecznie, zasugerowałem, iż proces wykrywania szumu wysokoczęstotliwościowego wymaga stosowania kilku funkcji jednocześnie, tj. funkcji autokorelacji, widmowej gęstości mocy, kierunku tekstury powierzchni oraz odcięcia danych T1-T2. Dodatkowo, wskazałem korzyści z jednoczesnego stosowania analizy powierzchni oraz profilowej wraz z wybranymi procedurami pomocniczymi, między innymi metody sklejanie profilu. Uwidocznilem błędy analizy danych pomiarowych SGP wynikające z wybiórczego stosowania jednej z wyżej wymienionych metod.

W publikacji **A13** określiłem wpływ gęstości wybranych cech powierzchni na metody przetwarzania danych pomiarowych SGP w celu wykrywania i redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości. Zastosowałem wyodrębnienie kierunkowe profili powierzchni w celu wzmocnienia procesu detekcji szumu wysokoczęstotliwościowego z zastosowaniem funkcji autokorelacji, widmowej gęstości mocy. Przeanalizowałem wpływ ilości oraz rozmiaru wybranych cech profilu na efekt wykrywania zakłóceń o wysokiej częstotliwości z użyciem wspomnianych funkcji. Uzyskałem potwierdzenie tezy, iż korelacja kierunku wyodrębnienia profilu powierzchni z kierunkiem procesu obróbki wykańczającej ma istotny wpływ na dokładność oceny występowania szumu o wysokiej częstotliwości w analizowanych danych pomiarowych SGP. Procedura TDM (z ang. *treatment direction method*) pozwala na ocenę występowania zakłóceń o wysokiej częstotliwości wyznaczając wyodrębnienie profili z powierzchni w kierunku wyznaczonym przez kierunki śladów obróbki (rysy). Pozwala to zmniejszyć amplitudę danych profilu, zwiększając jednocześnie dokładność detekcji szumu wysokoczęstotliwościowego z zastosowaniem funkcji autokorelacji oraz widmowej gęstości mocy.

W publikacji **A14** po raz pierwszy zdefiniowałem pojęcie ‘powierzchni szumu’ (z ang. *noise surface*). Wskazałem jak uzyskuje się powierzchnię szumu oraz którym składnikiem danych pomiarowych są wyodrębnione poprzez filtrację cyfrową dane klasyfikowane jako szum w dalszych badaniach naukowych. Dla powierzchni szumu określiłem odpowiednie cechy, zapisane jako właściwości W1, W2, W3 oraz W4. Wstępnie wskazałem przydatność funkcji autokorelacji, widmowej gęstości mocy, kierunku tekstury powierzchni oraz odcięcia danych do analizy występowania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych w wynikach pomiaru topografii powierzchni. Analizowałem powierzchnie cylindrów o różnym stopniu zużycia.

Autoreferat – Przemysław Podulka

W publikacji **A15** określiłem wpływ rozmieszczenia kieszeni smarowych na dokładność wykrywania danych wysokoczęstotliwościowych za pomocą analizy widoku izometrycznego powierzchni oraz z zastosowaniem widmowej gęstości mocy. Analizując rozmieszczenie kieszeni olejowych uwzględniłem: odległość między kieszeniami (D_{ds} z ang. *dimple-to-dimple distance*), odległość kieszeni smarowych od brzegu analizowanego obszaru powierzchni (D_{dte} z ang. *dimple-to-edge distance*), szerokość (D_{di} z ang. *dimple diameter/width*) oraz głębokość (D_{de} z ang. *dimple depth*) kieszeni smarowych. Określiłem wpływ wartości współczynników D_{ds} , D_{dte} , D_{di} oraz D_{de} na proces detekcji oraz redukcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z wyników pomiaru SGP sześciu rodzajów powierzchni. W części symulacyjnej badań wskazałem również korelację wybranych parametrów SGP względem amplitudy analizowanych zakłóceń pomiarowych.

W publikacji **A16** analizowałem SGP cylindrów po honowaniu z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami smarowym uwzględniając szczegółową analizę profilową. Uwidoczniałem problem wykrywania szumu wysokoczęstotliwościowego dla powierzchni zawierających szerokie wgłębienia. Dla danych profilowych zaproponowałem metodę wyodrębnienia części danych tzw. wierzchołkowych, dla których określony stosunek procentowy części wgłębienia do długości całkowitej profilu nie przekracza zdefiniowanych wartości. W proponowanej procedurze uwzględniłem również liczbę wgłębienia smarowych w profilu. Kolejno wskazałem przydatność oraz sposoby stosowania filtru FFTF w analizie SGP cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami olejowymi.

W publikacji **A17** wykonałem szczegółową analizę porównawczą wyznaczania powierzchni odniesienia za pomocą wielomianów stopni od 2-go do 4-go oraz filtrów Gaussowskich (GRF i RGRF). Badania te są istotne przy realizacji procedury trzystopniowego przygotowania danych pomiarowych do dalszej analizy po względem występowania oraz redukcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. W późniejszych badaniach szumu wysokoczęstotliwościowego wskazałem znaczenie wpływu eliminacji zarysu kształtu na dokładność detekcji analizowanych zakłóceń pomiarowych. Kolejno w artykule wskazałem błędy występujące podczas stosowania regularnego filtru regresji Gaussa (GRF) oraz filtru odpornego regresji Gaussa (RGRF), wielokrotnie opisanych i zalecanych przez standardy międzynarodowe (ISO) do analizy SGP, określone jako błędy analizy danych pomiarowych SGP. Zwróciłem uwagę jak można analizować wybrane rodzaje SGP z zastosowaniem wybranych filtrów cyfrowych, aby minimalizować błędy przyporządkowane do analizy danych pomiarowych.

W publikacji **A18** skoncentrowałem się na wpływie rozmiarów kieszeni smarowych SGP cylindrów po obróbce gładzenia płasko-wierzchołkowego na usuwanie zarysu kształtu z wyników pomiaru topografii powierzchni. Badania te stanowiły wstęp do określenia trzystopniowego przygotowania danych w celu analizy wyników pomiaru SGP po kątem występowania szumu o wysokiej częstotliwości. Dla przedstawionych w artykule rodzajów powierzchni, którymi były cylindry silników spalinowych po honowaniu

i dodatkowym wygniataniu kieszeni olejowych, określiłem metody wyznaczania powierzchni odniesienia SGP wraz z minimalizacją błędów oceny pojemności olejowej wgłębień smarowych. Wyznaczanie i usuwanie zarysu kształtu z SGP jest jednym z działań przygotowania danych do dalszej analizy, w tym do zdefiniowania i redukcji wysokoczęstotliwościowych zakłóceń pomiaru topografii powierzchni. Niejednokrotnie wyznaczanie powierzchni odniesienia zawiera w sobie poziomowanie, tyczy się to powierzchni dla których usuwa się zarys kształtu, min. wspomniane powierzchnie cylindryczne. W przypadku powierzchni dla których nie usuwa się zarys kształtu, wykonywałem procedurę poziomowania. W większości wykonanych badań naukowych analizowałem powierzchnie tzw. płaskie, dla których nie było wymagane wyznaczanie powierzchni odniesienia, czyli usuwanie zarysu kształtu. Ze względu na to, że powierzchnią odniesienia zajmowałem się w pracy doktorskiej, w której wyznaczyłem odpowiednie algorytmy do eliminacji zarysu kształtu, w dalszych badaniach bazowałem na wskazanych wcześniej metodach.

4.4. Podsumowanie

Reasumując, znajdujące się w przedstawionym do oceny jednotematycznym cyklu publikacji zrealizowane przeze mnie prace badawcze stanowią kilka przenikających się kierunków badań.

Jednym z kierunków było określenie wpływu zakłóceń pomiarowych na wyniki oceny właściwości powierzchni analizując jej SGP. Szum wysokoczęstotliwościowy pomiarów topografii powierzchni może wpływać na zniekształcenia wyników określania parametrów tekstury z normy ISO 25178, powodując ich odchylenia nawet o ponad 100%. Analizując kilkadziesiąt parametrów wskazałem kilka o największej czułości na występowanie wybranego rodzaju zakłócenia pomiarowego SGP. Parametry te określiłem jako czułe na występowanie szumu wysokoczęstotliwościowego i ich wariacje stanowiły odniesienie przy wielu działaniach związanych z weryfikacją stosowanych metod detekcji oraz redukcji zakłóceń o wysokiej częstotliwości.

Aby móc dobrać odpowiedni filtr cyfrowy do redukcji szumu o wysokiej częstotliwości, należało najpierw trafnie wytypować metody detekcji tego rodzaju zakłócenia pomiarowego. W tym celu zastosowałem wiele różnych rozwiązań, aby ocena występowania wspomnianego szumu była w jak największym stopniu jednoznaczna. Rozwiązaniami tymi były: wyodrębnienia obszarów oraz profili z powierzchni przy uwzględnianiu wartości współczynników odległości wybranych cech powierzchni względem siebie lub względem brzegów analizowanego obszaru powierzchni (współczynniki D_{ds} , D_{de} , D_{di} oraz D_{de} [A15]), wyodrębnienia części danych tzw. wierzchołkowych przy uwzględnieniu liczby wybranych cech na danym obszarze powierzchni [A16], określenie wpływu eliminacji zarysu kształtu na proces detekcji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych [A17] biorąc pod wagę rozmiar oraz rozmieszczenie kieszeni smarowych [A18], wyodrębnienia profili z określonych obszarów powierzchni uwzględniając kierunek tekstury powierzchni [A3, A6, A7, A9, A11, A13], zastosowanie funkcji odcięcia danych TRESH w polepszeniu oceny

Autoreferat – Przemysław Podulka

występowania szumu wysokoczęstotliwościowego [A2, A3, A9], analiza kształtu funkcji autokorelacji [A9].

Opracowałem alternatywną metodę doboru filtra oraz jego długości odcięcia *cut-off*, przy minimalizacji negatywnego wpływu filtracji cyfrowej na zmiany parametrów SGP z normy ISO 25178. Metoda tą oparłem na ocenie danych będących residuum procesu cyfrowej filtracji, zdefiniowanych jako powierzchnia szumu. Określając jej odpowiednie cechy, opisane jako W1, W2, W3 oraz W4, można zweryfikować stosowność badanego rodzaju filtracji oraz jej długości odcięcia *cut-off* podczas redukcji wysokoczęstotliwościowych zakłóceń pomiaru topografii powierzchni. Do weryfikacji uzyskanych danych powierzchni szumu zastosowałem kilka metod analizy danych: funkcję autokorelacji, funkcję widmowej gęstości mocy, funkcję kierunku tekstury powierzchni, a także funkcję odcięcia danych TRESH.

Walidację proponowanej metodyki przeprowadziłem z wykorzystaniem metody uśredniania wartości powtórzonych pomiarów SGP według normy ISO 25178, część 600 oraz część 700. Wskazany przez proponowaną metodykę badań filtr cyfrowy oraz jego długość odcięcia *cut-off* zostały potwierdzone przez porównanie do metody uśredniania powtórzonych pomiarów topografii powierzchni. Wskazany przez metodykę filtr pozwalający osiągnąć wyniki najbardziej zbliżone do wartości uzyskanej z uśredniania powtórzonych trzykrotnie pomiarów był klasyfikowany jako najbardziej odpowiedni do redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiaru SGP.

Poprzez wykonanie szeregu badań na różnych rodzajach powierzchni oraz wykonując pomiary różnymi urządzeniami, potwierdziłem przydatność metody dla wielu powszechnie stosowanych materiałów. Dla każdego rodzaju topografii powierzchni zasugerowałem odpowiedni filtr cyfrowy, który powoduje najmniejsze zniekształcenia uzyskanych danych podczas redukcji szumu wysokoczęstotliwościowego. Wyniki te zostały zebrane i przedstawione w Tabeli 3, wraz z odniesieniem do poszczególnych publikacji naukowych.

Analizie poddałem kilkanaście rodzajów powierzchni, wykonanych za pomocą wielu różnych rodzajów obróbki wykańczającej, także powierzchnie po badaniach niszczących. Tabela 3 zawiera wykaz wszystkich rodzajów badanych powierzchni, z wyróżnieniem dla poszczególnych publikacji naukowych, zawartych w cyklu publikacji poddawanych ocenie.

Jako metody pomiarowe zastosowałem w większości badań urządzenia bezstykowe, które są obecnie popularnymi technikami pomiaru topografii powierzchni biorąc pod uwagę względnie niedługi czas zbierania danych pomiarowych, jednak w wybranych publikacjach przedstawiłem także wyniki wykonane za pomocą urządzeń stykowych, kilkakrotnie porównując wyniki zastosowania proponowanej metodologii między różne techniki pomiaru SGP. Proponowana metodyka badań potwierdziła się co do wyników pomiarów uzyskanych urządzeniami zarówno bezstykowymi, jak i stykowymi, przy czym detekcja i usuwanie szumu o wysokiej częstotliwości były zdefiniowane jako podstawowy cel w analizie bezstykowych wyników pomiaru topografii powierzchni.

Kierunki dalszych badań:

- ocena wpływu innych rodzajów zakłóceń pomiaru topografii powierzchni na zmiany parametrów tekstury z normy ISO 25178;
- ulepszenie i dopasowanie proponowanej metodyki w odniesieniu do kolejnych rodzajów topografii powierzchni;
- analiza danych topografii powierzchni uzyskanych z pomiarów stykowych, biorąc pod uwagę różne rodzaje zakłóceń zewnętrznych;
- określenie wpływu wybranych cech powierzchni na ocenę wielu rodzajów zakłóceń pomiaru topografii powierzchni.

4.5. Literatura

- [1] Thomas TR. *Rough Surfaces*. Longman: New York, NY, USA, 1982.
- [2] Pawlus P. *Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2006.
- [3] Janecki D. Gaussian filters with profile extrapolation. *Precision Engineering* 2011, 35(4), 602-606.
- [4] ISO 16610-61:2015 *Geometrical product specification (GPS) — Filtration — Part 61: Linear areal filters — Gaussian filters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland 2015.
- [5] Raja J., Muralikrishnan B., Fu S. *Recent advances in separation of roughness, waviness and form*. *Precision Engineering* 2002, 26, 222–235.
- [6] Dobrzański P., Pawlus P. *A study of filtering techniques for areal surface topography assessment*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2011, 225, 2096–2107.
- [7] Podulka P., Dobrzański P., Pawlus P., Lenart A. *The effect of reference plane on values of areal surface topography parameters from cylindrical elements*. *Metrology and Measurement Systems* 2014, 21, 247–256.
- [8] Dobrzański P., Pawlus P. *Digital filtering of surface topography: Part I. Separation of one-process surface roughness and waviness by Gaussian convolution, Gaussian regression and spline filters*. *Precision Engineering* 2010, 34, 647–650.
- [9] Thomas TR. *Comparison of Scanning Electron Microscopy and Stylus Raster Measurements of Wear*. *Wear* 1986, 109, 343–350.
- [10] Ohlsson R, Wihlborg A, Westberg H. *The accuracy of fast 3D topography measurements*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2001, 41/13–14, 1899-1907.
- [11] Goch G, Volk R, Kunzmann H. *Contactless Surface Measurement with a New Acoustic Sensor*. *CIRP Annals* 1994, 43/1, 487-490.
- [12] Vorburger TV, Rhee HG, Renegar TB, Song J-F, Zheng A. *Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2007, 33, 110–118.
- [13] Pawlus P, Reizer R, Wiczorowski M. *Comparison of results of surface texture measurement obtained with stylus methods and optical methods*. *Metrology and Measurement Systems* 2018, 25, 589–602.
- [14] Gao W, Haitjema H, Fang FZ, Leach RK, Cheung CF, Savio E, Linares JM. *On-Machine and in-Process Surface Metrology for Precision Manufacturing*. *CIRP Annals* 2019, 68, 843–866.
- [15] Podulka P. *Proposal of frequency-based decomposition approach for minimization of errors in surface texture parameter calculation*. *Surface and Interface Analysis* 2020, 52, 882–889.
- [16] Gomez C, Su R, de Groot P, Leach RK. *Noise Reduction in Coherence Scanning Interferometry for Surface Topography Measurement*. *Nanomanufacturing and Metrology*. 2020, 3, 68–76.

Autoreferat – Przemysław Podulka

- [17] ISO 25178-600:2019 *Geometric Product Specifications (GPS)–Surface texture: Areal – Part 600: Metrological characteristics for areal topography measuring instruments*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.
- [18] ISO 25178-700:2022. *Geometrical product specifications (GPS) Surface texture: Areal Part 700: Calibration, adjustment and verification of areal topography measuring instruments*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2022.
- [19] Li Z, Gröger S. *Investigation of noise in surface topography measurement using structured illumination microscopy*. Metrology and Measurement Systems 2021, 28, 4.
- [20] Vanrusselt M, Haitjema H. *Characterization of measurement and instrument noise in areal surface topography measurements by the Allan deviation*. CIRP Annals 2023, 72(1), 485-488.
- [21] Ma L, Yin X, Yang F, Liu X, Zhao X, Pei X. *Noise analysis and correction on carrier phase in coherence scanning interferometry for high accuracy surface topography measurements*. Measurement 2025, 239, 115419.
- [22] Kiselev I, Kiselev EI, Drexel M, Hauptmannl M. *Noise robustness of interferometric surface topography evaluation methods. Correlogram correlation*. Surface Topography: Metrology and Properties 2017, 5, 045008.
- [23] Podulka P. *Detection of measurement noise in surface topography analysis*. Journal of Physics: Conference Series 2021, 1736, 012014.
- [24] Podulka P. *Feature-based characterisation of turned surface topography with suppression of high-frequency measurement errors*. Sensors 2022, 22, 9622.
- [25] Podulka P. *Roughness evaluation of burnished topography with a precise definition of the S-L surface*. Applied Sciences 2022, 12, 12788.
- [26] ISO 25178-2:2021 *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland 2021.
- [27] Podulka P. *Resolving Selected Problems in Surface Topography Analysis by Application of the Autocorrelation Function*. Coatings 2023, 13, 74.
- [28] Podulka P. *Proposals of Frequency-Based and Direction Methods to Reduce the Influence of Surface Topography Measurement Errors*. Coatings 2022, 12, 726.
- [29] Podulka P, Macek W, Branco R, Nejad RM. *Reduction in errors in roughness evaluation with an accurate definition of the S-L surface*. Materials 2023, 16, 1865.
- [30] Podulka P, Kulisz M, Antosz K. *Evaluation of high-frequency measurement errors from turned surface topography data using machine learning methods*. Materials 2024, 17, 1456.
- [31] Podulka P. *Selection of reference plane by the least square fitting methods*. Advances in Science and Technology. Research Journal 2016, 10(30), 164-175.
- [32] Pawlus P, Dobrzański P, Podulka P. *Modyfikacja filtru cyfrowego w odniesieniu do powierzchni zawierających szerokie wgłębienia*. Mechanik 2014, 87, 291-298.
- [33] Podulka P, Pawlus P, Dobrzański P. *Wyodrębnianie wgłębień na powierzchniach cylindrycznych*. Mechanik 2016, 11, 1700-1701.
- [34] Podulka P. *The effect of valley location in two-process surface topography analysis*. Advances in Science and Technology. Research Journal 2018, 12(4), 97-102.
- [35] Zmarzły P, Kozior T, Gogolewski D. *The effect of non-measured points on the accuracy of the surface topography assessment of elements 3D printed using selected additive technologies*. Materials 2023, 16, 460.
- [36] Pawlus P, Reizer R, Wieczorowski M. *Problem of non-measured points in surface texture measurements*. Metrology and Measurement Systems 2017, 24, 525–536.
- [37] Leach R, Evans C, He L, Davies A, Duparré A, Henning A, Jones CW, O'Connor D. *Open questions in surface topography measurement: A roadmap*. Surface Topography Metrology and Properties 2015, 3, 13001.
- [38] Wang C, Caja J, Gómez E. *Comparison of methods for outlier identification in surface characterization*. Measurement 2018, 117, 312-325.

Autoreferat – Przemysław Podulka

- [39] Le Goic G, Brown CA, Favreliere H, Samper S, Formosa F. *Outlier filtering: A new method for improving the quality of surface measurements*. Measurement Science and Technology 2012, 24, 015001.
- [40] Podulka P. *The effect of spikes occurrence on surface texture parameter assessments*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019, 473(1), 012039.
- [41] Podulka P, Pawlus P, Dobrzański P, Lenart A. *Spikes removal in surface measurement*. Journal of Physics: Conference Series 2014, 483(1), 012025.
- [42] Lou S, Tang D, Zeng W, Zhang T, Gao F, Muhamedsalih H, Jiang X, Scott PJ. *Application of clustering filter for noise and outlier suppression in optical measurement of structured surfaces*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2020, 69, 6509–6517.
- [43] Podulka P. *Proposal of edge-area form removal of cylindrical surfaces containing wide dimples by application of various robust processing techniques*. Journal of Physics Conference Series 2018, 1065, 072018.
- [44] Podulka P. *Problem of selection of reference plane with deep and wide valleys analysis*. Journal of Physics Conference Series 2018, 1065, 072017.
- [45] Podulka P. *Edge-area form removal of two-process surfaces with valley excluding method approach*. MATEC Web of Conferences 2019, 252, 05020.
- [46] Maculotti G, Genta G, Quagliotti D, Galetto M, Hansen HN. *Gaussian process regression-based detection and correction of disturbances in surface topography measurements*. Quality and Reliability Engineering International 2022, 38, 1501-1518.
- [47] Lou S, Jiang X, Scott PJ. *Application of the morphological alpha shape method to the extraction of topographical features from engineering surfaces*. Measurement 2013, 46, 1002–1008.
- [48] Lou S, Jiang X, Sun W, Zeng W, Pagani L, Scott PJ. *Characterisation methods for powder bed fusion processed surface topography*. Precision Engineering 2019, 57, 1-15.
- [49] Jaglarz J. *Topography description of thin films by optical Fourier Transform*. Thin Solid Films 2008, 516, 8077–8081.
- [50] Jacobs TDB, Junge T, Pastewka L. *Quantitative characterization of surface topography using spectral analysis*. Surface Topography: Metrology and Properties 2017, 5, 013001.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej

Moja aktywność naukowa obejmuje współpracę z ośrodkami naukowymi zarówno z Polski, jak i zagranicą. Większość nawiązanych przeze mnie kontaktów z innymi niż Politechnika Rzeszowska ośrodkami naukowymi były związane z aktywnym uczestnictwem w konferencjach naukowych, zarówno jeszcze przed, jak i po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Jeszcze jako doktorant, pozyskując grant naukowy z Narodowego Centrum Nauki w ramach konkursu Preludium V, tytuł projektu: ‘Dobór powierzchni odniesienia w pomiarach struktury geometrycznej’, jednocześnie uzyskałem możliwość udziału w konferencjach naukowych ‘2014 4th International Conference on Surface Metrology’, 10-13.03.2014, Hamburg, Niemcy; ‘2015 14th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces’, 2-5.03.2015, Charlotte, University of North Carolina, Stany Zjednoczone; oraz ‘2016 5th International Conference on Surface Metrology’, 4-7.04.2016, Politechnika Poznańska, Poznań, Polska. Wszystkie te wydarzenia naukowe były konferencjami o zasięgu światowym, pozwalając na spotkanie, rozmowę, wymianę spostrzeżeń oraz nawiązanie kontaktu z wieloma specjalistami z dziedziny metrologii powierzchni.

Już po doktoracie uczestniczyłem w dwóch światowych kongresach organizacji IMEKO (International Measurement Confederation), odpowiednio ‘22nd World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018)’, 3-6 września 2018, Belfast, Wielka Brytania oraz ‘22nd World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2021)’, 30 sierpnia - 3 września 2021, Yokohama, Japonia. Razem z konferencjami ICSM oraz Met&Props są to najbardziej rozpoznawalne konferencje naukowe poświęcone ogólnie pojętej metrologii, w tym metrologii powierzchni.

Udział w tak prestiżowych konferencjach naukowych pozwolił zapoznać się z wieloma obecnymi zagadnieniami w dziedzinie metrologii powierzchni, jak i nawiązać kontakt z naukowcami z całego świata. Wystąpienia na międzynarodowych konferencjach pozwalały także zaprezentować swoje dotychczasowe wyniki badań szerszemu gronu naukowców, jednocześnie zachęcając ich do podjęcia współpracy. W ramach wyjazdów konferencyjnych miałem także możliwość zapoznać się z zapleczem naukowym takich uczelni jak Uniwersytet Karoliny Północnej, czy Uniwersytet w Hamburgu.

Kolejno, uczestnicząc w wyjeździe w ramach programu Erasmus+, oprócz przeprowadzonych zajęć dydaktycznych, które dotyczyły ciągu tematów z zakresu metrologii topografii powierzchni, mogłem poznać zaplecze laboratoryjne uczelni University of the Basque Country z zamiejscowym wydziałem Faculty of Engineering Vitoria-Gasteiz w kwietniu 2019 roku.

Autoreferat – Przemysław Podulka

W czerwcu 2024 roku odbyłem miesięczny staż naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Wiedza i doświadczenie opiekuna stażu pomogła w wykonaniu badań naukowych owocujących publikacją pt. ‘Study of vibrational surface topography measurement errors of LPBF Inconel 718 alloy after shot peening process’ w renomowanym czasopiśmie naukowym Measurement, IF2024 = 5.6, 200 pkt. wg. MNiSW, publikacja A2. Dzięki wiedzy i doświadczeniu opiekuna stażu możliwe było dokładne przeprowadzenie analizy powierzchni poddanej procesowi kulowania. Staż naukowy był nie tylko świetną okazją poznania pracy badawczej innej jednostki uczelnianej, ale także pozwolił nawiązywać dłuższe relacje naukowe z pracownikami danej uczelni. W tym przypadku kontynuacja współpracy zaowocowała kolejnym artykułem naukowym pt. ‘Study of WC-Co-based hard metals surface topography with the contactless vibrational measurement noise evaluation’, będący obecnie w recenzji.

W okresie 15.08.2024 – 12.09.2024 odbyłem staż naukowy w Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Prešov, The Technical University of Košice, Słowacja, w ramach Visegrad Fellowship Program. Pobyt w zagranicznej jednostce naukowej pozwolił nie tylko na zebranie doświadczenia w badaniach u bardziej doświadczonych naukowców, ale także na nawiązanie współpracy z kolejnymi osobami oraz kolejną jednostką naukową spoza Polski. Staż pozwolił mi także zebrać doświadczenie w analizie materiałów poddanych chemicznej obróbce powierzchniowej pod względem szczegółowej analizy SGP. Podjęta przeze mnie współpraca i przeprowadzenie wspólnych badań naukowych zaowocowały publikacją artykułu naukowego pt. ‘Study of etched surface topography with the compensation of contactless vibrational measurement errors’ w czasopiśmie Measurement, IF2024 = 5.6, 200 pkt. wg. MNiSW, oznaczony we wniosku jako publikacja A3.

W okresie 01.02.2025 – 29.03.2025 odbyłem staż naukowy w Institute of Manufacturing Science, University of Miskolc, Węgry. Poznałem możliwości pracy w kolejnej zagranicznej jednostce naukowej realizującej wiele projektów badawczych. Współpraca była istotna w podjęciu się przeze mnie analizy topografii powierzchni tytanowych, których obróbka powierzchniowa stanowi duże wyzwanie technologiczne ze względu min. na trudność w obróbce oraz dużą zużywalność narzędzi obróbkowych. Dokładność analizy SGP tego rodzaju obrabianego materiału stanowi ważną kwestię min. w ocenie stopnia zużycia narzędzi, jak i w całym procesie kontrolnym obróbki warstwy wierzchniej. Rezultatem współpracy i wykonania wspólnych badań naukowych było opublikowanie artykułu pt. ‘Roughness evaluation of machined Ti-6Al-4V alloys with a study of surface topography measurement noise’, Measurement, IF2024 = 5.6, 200 pkt. wg. MNiSW, oznaczony we wniosku jako publikacja A1.

Oprócz współpracy podjętej w ramach wspomnianych staży prowadzę kilka innych działań z jednostkami zagranicznymi. Od czerwca 2023 roku kontynuuję współpracę z portugalskim centrum naukowym CEMMPRE – Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes oraz jednostką Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, w ramach projektów FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia (projekt nr: UIDB/00285/2020 oraz nr: LA/P/0112/2020). Profesorowie ze wspomnianej jednostki posiadają duże doświadczenie w analizie topografii powierzchni, właściwości materiałów oraz badań zmęczeniowych. Współpraca ta

Autoreferat – Przemysław Podulka

pozwoliła na możliwość analizy topografii powierzchni po badaniach zmęczeniowych. Ten rodzaj SGP oraz samych badań pozwolił na poszerzenie zakresu moich badań nad wpływem zakłóceń o wysokiej częstotliwości na wyniki pomiaru topografii powierzchni. W ramach podjętej współpracy opublikowałem pięć artykułów w którym jestem autorem głównym (pierwszym) oraz dwa artykuły, w których byłem autorem trzecim, co daje sumarycznie siedem publikacji [A4, A5, A6, A8, A9 oraz 9, 10 w wykazie osiągnięć naukowych, podpunkt 2.4.], wszystkie wydane w czasopismach z wydawnictwa Elsevier. Wspólne z autorami z jednostki portugalskiej artykuły zostały opublikowane w następujących trzech czasopismach: cztery artykuły w czasopiśmie Measurement (IF2024 = 5.6, MNiWS 200 pkt.), dwa w czasopiśmie Precision Engineering (IF2024 = 3.7, 200 pkt. MNiSW), jeden w czasopiśmie Engineering Failure Analysis (IF2024 = 5.7, 100 pkt. MNiSW).

Oprócz jednostek zagranicznych, prowadzę także współpracę z kilkoma jednostkami naukowymi z Polski. Od grudnia 2022 roku współpracuję z naukowcami z Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. Wymiana doświadczenia oraz wykonanie wspólnych badań naukowych pozwoliły na publikację siedemnastu wspólnych artykułów, w tym dwunastu w wydawnictwie Elsevier [A2, A4, A5, A6, A7, A8, A9, oraz 2, 6, 7, 9, 10 w wykazie osiągnięć naukowych, podpunkt 2.4.] oraz dwóch w wydawnictwie Springer [1, 3 w wykazie osiągnięć naukowych, podpunkt 2.4.]. Szerokie spektrum badań obejmowało analizę topografii wielu różnych materiałów, zaczynając od standardowych stopów poddawanych obróbce powierzchniowej, poprzez materiały kompozytowe oraz ceramiczne, po materiały poddane testom zmęczeniowym. Badanie szerokiej gamy materiałów, poddanych różnym rodzajom obróbki lub testom niszczącym, pozwoliło na weryfikację zaproponowanej metodologii badań nad określeniem oraz redukcją zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z wyników pomiaru topografii powierzchni.

Analiza topografii powierzchni materiałów po badaniach zmęczeniowych była możliwa także dzięki współpracy z naukowcami z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. Zespół międzyuczelniany, w skład którego wchodził pracownicy Politechniki Gdańskiej, Politechniki Wrocławskiej, Politechniki Opolskiej oraz University of Coimbra, oprócz badań na wynikami testów zmęczeniowych [2, 6, 9, 10 w wykazie osiągnięć naukowych, podpunkt 2.4.], uczestniczył także w analizie SGP za pomocą funkcji autokorelacji [A9].

Współpracę naukową podjąłem także z pracownikami Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej. Wspólne badania obejmowały analizę SGP materiałów poddawanych różnego rodzaju obróbce [A7, A9], także materiałów po testach zmęczeniowych [A4, A5, A8]. Doświadczenie w pracy grupy naukowców z kilku uczelni jednocześnie rzutowało w nabraniu przeze mnie większego doświadczenia naukowego dla dalszych badań nad zakłóceniami pomiarowymi topografii różnorodnych powierzchni.

Podsumowując, moje doświadczenie naukowe oparte jest na współpracy z jednostkami naukowymi zarówno z Polski, jak i zagranicy.

Autoreferat – Przemysław Podulka

Do podjętej przeze mnie współpracy zagranicznej mogą zaliczyć następujące jednostki naukowe:

- Department of Mechanical Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugalia;
- Institute of Manufacturing Science, University of Miskolc, Miskolc, Węgry;
- Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Prešov, The Technical University of Košice, Koszyce-Presov, Słowacja.

Natomiast do współpracy krajowej mogą zaliczyć:

- Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska;
- Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska;
- Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska;
- Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

Pracując od 1 września 2017 roku na **Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa** Politechniki Rzeszowskiej, na stanowisku adiunkta, prowadzę następujące zajęcia dydaktyczne (wykłady, laboratoria, zajęcia projektowe) na studiach inżynierskich oraz magisterskich:

- Przygotowanie i organizacja produkcji (kierunek: mechanika i budowa maszyn);
- Produkcja odchudzona (kierunek: mechanika i budowa maszyn);
- Narzędzia odchudzania produkcji (kierunek: zarządzanie i inżynieria produkcji);
- Dystrybucja wyrobów (kierunek: zarządzanie i inżynieria produkcji);
- Inżynieria produkcji (kierunek: inżynieria wzornictwa przemysłowego);
- Zarządzanie Jakością i Bezpieczeństwem (kierunek: zarządzanie i inżynieria produkcji);

Prowadziłem także zajęcia w zamiejscowym **Wydział Mechaniczno-Technologicznym** Politechniki Rzeszowskiej:

- Systemy zarządzania środowiskiem EMAS (kierunek: zarządzanie i inżynieria produkcji);
- Standaryzowane systemy zarządzania (kierunek: zarządzanie i inżynieria produkcji);

Prowadzę również zajęcia na **Wydziale Chemicznym** Politechniki Rzeszowskiej:

- Lean management w produkcji farmaceutycznej (kierunek: inżynieria farmaceutyczna).

Prowadzę także zajęcia na **studiach podyplomowych** Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej:

- Systemy jakości w narzędziowniach (kierunek: konstrukcja form wtryskowych).

Od 2021 roku prowadzę zajęcia **Lean Manufacturing**, a od roku 2024 także przedmiot **Quality Management**, ze **studentami** w ramach programu **ERASMUS**. Sumarycznie, przeprowadziłem **171 godzin dydaktycznych** ze studentami z Portugalii, Hiszpanii oraz Turcji.

W latach 2017-2024 pełniłem funkcję **planisty** i układałem oraz korygowałem **rozkład zajęć** na kierunku zarządzanie i inżynieria produkcji, studia stacjonarne, dla studiów inżynierskich oraz studiów magisterskich.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 90 studentami, w tym pełniłem funkcję **promotora 41 prac inżynierskich** oraz **49 prac magisterskich**. Wykonałem **recenzję 52 prac dyplomowych**, w tym **33 inżynierskich** oraz **19 magisterskich**. (Stan na dzień 23.10.2025 r.).

Autoreferat – Przemysław Podulka

Dodatkowo, dwukrotnie jako **członek komisji** uczestniczyłem w **obronach prac dyplomowych inżynierskich** (luty 2020, luty 2021), w obydwu przypadkach na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, raz na wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa, a raz na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym.

Od 2022 roku jestem także **członkiem grupy Dydaktyczne Czwartki na PRz**. Celem działalności tej grupy jest dyskusja na temat bieżących problemów związanych z działalnością dydaktyczną na Politechnice Rzeszowskiej, uwzględniając kwestie dla poszczególnych wydziałów uczelni.

7. Inne informacje dotyczące uzyskanych osiągnięć oraz kariery zawodowej wnioskodawcy

Jako jedno z najważniejszych osiągnięć naukowych o skali międzynarodowej mogę wyszczególnić, iż za okres od 01.09.2021 do 31.08.2022, okres od 01.09.2022 do 31.08.2023, okres od 01.09.2023 do 31.08.2024 oraz okres od 01.09.2024 do 31.08.2025, zostałem **czterokrotnie** sklasyfikowany wśród **2% naukowców**, których prace według rankingu '**Updated science-wide author databases of standardized citation indicators**', opracowanego przez **Uniwersytet Stanforda** we współpracy z firmą **Elsevier**, były najczęściej cytowane przez innych autorów.

Uzyskałem nagrodę '**Certificate of a Top Cited Article in 2020-2021**' z czasopisma **Metrology and Measurement Systems** (IF2024 = 1.1, 100 pkt. MNiSW) wydawnictwa **Polskiej Akademii Nauk**, za artykuł pt. '*Comparisons of envelope morphological filtering methods and various regular algorithms for surface texture analysis*' o największej liczbie cytowań w latach 2020-2021.

Uzyskałem nagrodę '**Top Cited Article 2020-2021**' z czasopisma **Surface and Interface Analysis** (IF2024 = 1.8, 40 pkt. MNiSW) wydawnictwa **Wiley**, za artykuł pt. '*Proposal of frequency-based decomposition approach for minimization of errors in surface texture parameter calculation*'.

Uzyskałem nagrodę '**Top Cited Article 2020-2021**' z czasopisma **Surface and Interface Analysis** (IF2024 = 1.8, 40 pkt. MNiSW) wydawnictwa **Wiley**, za artykuł pt. '*Bisquare robust polynomial fitting method for dimple distortion minimization in surface quality analysis*'.

Uzyskałem nagrodę '**Top 10 Cited Papers in 2021 in the Section: Manufacturing Processes and Systems**' z czasopisma **Materials**, IF2024 = 3.2, 140 pkt. MNiSW, za jeden z dziesięciu najczęściej cytowanych artykułów naukowych pt. '*Reduction of Influence of the High-Frequency Noise on the Results of Surface Topography Measurements*' w roku 2021, uwzględniając sekcję tematyczną '*Manufacturing Processes and Systems*'.

Za okres 2024 roku otrzymałem wyróżnienie oraz nagrodę '**Materials 2024 Outstanding Reviewer Award**' będąc sklasyfikowanym jako jeden z sześciu osób wykonujących dokładną i rzetelną pracę recenzenta dla czasopisma **Materials**, IF2024 = 3.2, 140 pkt. MNiSW.

Za rok 2024 roku zostałem sklasyfikowany na liście '**Outstanding Reviewers**' w czasopiśmie **Metrology and Measurement Systems** (IF2024 = 1.1, 100 pkt. MNiSW) wydawnictwa **Polskiej Akademii Nauk**, wykonując drugą w klasyfikacji (spośród wszystkich recenzentów dla czasopisma) liczbę recenzji za wspomniany okres.

Autoreferat – Przemysław Podulka

Jako dodatkowe osiągnięcia mojej kariery zawodowej mogę wyszczególnić także, iż w latach akademickich 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022, 2022/2023, 2023/2024 oraz 2024/2025 corocznie otrzymywałem **Nagrody Rektora Politechniki Rzeszowskiej** za publikacje artykułów naukowych z wykazu MNiSW o liczbie punktów 100, 140 oraz 200. Łączna liczba nagrodzonych publikacji: 19.