

## **Eliminacja zakłóceń topografii powierzchni cylindrów silników spalinowych z zastosowaniem Transformaty Falkowej Pochodnych Gaussowskich**

### **Wprowadzenie – zakłócenia rezultatów pomiaru struktury geometrycznej powierzchni**

Badanie zużycia elementów stykowych przeprowadza się poprzez analizę struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Do procedury tej należy pomiar powierzchni, następnie cyfrowa jej analiza. Pomiary SGP bardzo często wykonuje się za pomocą następujących urządzeń: profilometr stykowy, mikroskop konfokalny oraz interferometr światła białego. Zastosowanie urządzeń optycznych jest znacznie szybsze, co pozwala na analizę większej ilości elementów. Jednak podczas pomiaru powierzchni tą metodą pojawiają się pewnie błędy. Należą do nich: występowanie punktów niemierzonych, pojedyncze wierzchołki zwane szpilkami oraz zakłócenia wysokoczęstotliwościowe.

Oprogramowanie komercyjne zawiera sposoby uzupełniania punktów niemierzonych powierzchni. Stosowane algorytmy są dokładne, prawidłowo wskazują wartości rzędnych wysokości danych punktów. Oprogramowanie profilometru posiada także algorytmy do eliminacji pojedynczych wierzchołków powierzchni. Odpowiednie procedury doboru parametrów poszczególnych algorytmów także zostały dobrane. Pozostaje jednak wiele niejasności co do usuwania wysokoczęstotliwościowych zakłóceń z rezultatów pomiarów struktury geometrycznej powierzchni za pomocą przyrządów optycznych.

Występowanie szumu wysokoczęstotliwościowego powoduje błędne oszacowanie parametrów stereometrii powierzchni oraz właściwości stykowych elementów silników spalinowych. Wykonano już badania dotyczące wpływu zakłóceń wysokoczęstotliwościowych na parametry stereometrii powierzchni. Najbardziej czułe na występowanie wysokoczęstotliwościowego szumu są parametry: połowy stosunek materiałowy powierzchni  $S_{mr}$ , nachylenie średniokwadratowe  $S_{dq}$ , rozwinięte pole międzyfazowe  $S_{dr}$ , gęstość wierzchołków  $S_{pd}$  oraz średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków powierzchni  $S_{pc}$ .

### **1. Badane materiały**

W pracy badano elementy silnika spalinowego po dwuprocesowej obróbce. Analizowano powierzchnie cylindrów po obróbce gładzenia płasko-wierzchoł-

kowego oraz po wygniataniu kieszeni olejowych. Przebadano łącznie 20 powierzchni. Analizie poddano parametry zawarte w normie ISO-25178 ze szczególnym uwzględnieniem parametrów z grupy Sk (głębokość chropowatości rdzenia Sk, zredukowana wysokość wierzchołka Spk, zredukowana głębokość dolin Svk, górnej Sr1 oraz dolnej Sr2 powierzchni nośnej).

Pomiary powierzchni wykonano za pomocą interferometru światła białego Talysurf CCI Lite. Rozmiary badanych powierzchni to 3.35 x 3.35 mm (1024 x 1024 punkty pomiarowe), natomiast krok próbkowania względem osi x oraz y wynosiła 3.27 μm, osi z 0.01 nm.

Zastosowany do eliminacji algorytm Transformaty Falkowej Pochodnych Gaussowskich (TFPG) wykonano za pomocą środowiska Matlab firmy MathWorks, wersja R2012a (numer licencji: 663409). Parametry stereometrii powierzchni zostały określone za pomocą oprogramowania profilometru – programu TalyMap Topography XT.

## 2. Model matematyczny Transformaty Falkowej Pochodnych Gaussowskich

Falki definiowane są jako funkcje odwzorowujące zbiór liczb rzeczywistych w zbiór liczb rzeczywistych. Każda z tych funkcji jest wyprowadzana z tzw. funkcji macierzystej za pomocą przesunięcia oraz skalowania. Jej podstawa jest opisana za pomocą następującego wzoru:

$$\psi_{j,k}(t) = 2\psi(2^j t + k), \quad (1)$$

gdzie  $j, k$  – liczby całkowite,  $\psi$  – funkcja matka,  $\psi_{j,k}$  – falka o skali  $j$  oraz przesunięciu  $k$ .

Funkcje Falkowe dążą do zera, podczas dążenia argumentu do nieskończoności. Suma ważona tychże funkcji umożliwia zadaną dokładnością określić dowolną funkcję ciągłą całkowalną z kwadratem. Aby wygenerować funkcję Falkową, należy skorzystać z następującego wzoru:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

Współczynnik skali  $a > 0$  odpowiada za zmianę częstotliwości, jaką reprezentuje falka. Za przesunięcie odpowiada natomiast parametr  $b$ . Gdy wartość parametru  $a$  zostanie zmieniona (zwiększona lub zmniejszona), falka zostaje rozciągnięta lub spłaszczona. Jednocześnie następują zmiany jej amplitudy – zwiększenie podczas spłaszczenia oraz zmniejszenie podczas rozszerzania. Na zmianę amplitudy odpowiada człon:

$$\frac{1}{\sqrt{a}} \quad (3)$$

Przekształcenia te są nazywane normalizacjami falek. Normalizacja jest istotna ze względu na pole powierzchni (czyli całka), które dla dowolnego rozciągnięcia jest jednakowe – stałe.

W pracy zastosowano algorytm ang. Differential of Gaussian (DOG Wavelet), zwany Transformatą Falkową Pochodnych Gaussowskich. Jest ona stosowana m.in. w grafice komputerowej do poprawy jakości w skali szarości. Dzięki jej stosowaniu można zwiększyć widoczność krawędzi oraz innych detali z obrazu. M-ty rząd pochodnej falki Gaussowskiej jest definiowany jako:

$$\Psi(s\omega) = -\frac{1}{\sqrt{\Gamma(m+1/2)}} (js\omega)^m e^{-(s\omega)^2/2} \quad (4)$$

gdzie:  $\Gamma()$  oznacza funkcję gamma.

Pochodna ta musi być określonego rzędu, czyli liczbą naturalną oprócz zera. Skalą częstotliwości ze współczynnika Fouriera dla falki TFPG jest:

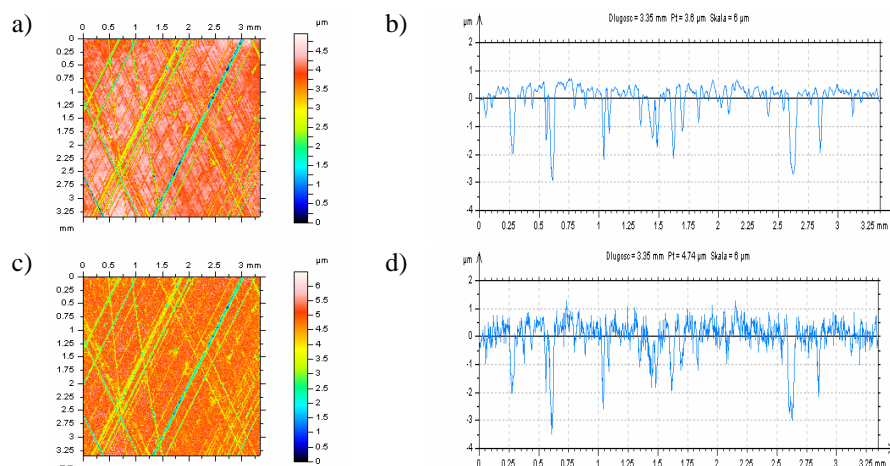
$$\frac{2\pi s}{\sqrt{m + \frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Najmniejszą domyślną wartością skali dla falki TFPG jest  $2*dt$ , gdzie  $dt$  jest okresem próbkowania. Natomiast domyślną wartością odstepu pomiędzy skalami falki TFPG jest  $ds$  równy 0,4875.

### **3. Procedura eliminacji szumu wysokoczęstotliwościowego ze struktury geometrycznej powierzchni cylindrów silników spalinowych za pomocą Transformaty Falkowej Pochodnych Gaussowskich**

Zbadanie dokładności usuwania szumu wysokoczęstotliwościowego z wyników pomiarów struktury geometrycznej powierzchni cylindrów silników spalinowych wymagało stworzenia odpowiedniej procedury. Analiza widoku izometrycznego, jak i widmowej gęstości mocy powierzchni nie dawała istotnych informacji o obecności zakłóceń wysokoczęstotliwościowych.

Także i widmowa gęstość mocy dla poszczególnych profili powierzchni nie pozwalała na wykrycie występującego szumu. Jedynie widok profilu pozwalał na zauważenie tychże zakłóceń. Nie dawał on jednak odpowiednich informacji, w jaki sposób należy go eliminować. Opracowano więc procedurę usuwania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych z topografii powierzchni. Badania swe oparto na elementach modelowanych, a także mierzonych.



**Rys. 1. Widok izometryczny (a, c) oraz profile powierzchni (b, d) cylindra modelowane (a, b) i po dodaniu szumu wysokoczęstotliwościowego (c, d)**

**Tabela 1**

**Parametry stereometrii powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz po eliminacji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych**

Parametry	Powierzchnia modelowana	Powierzchnia z zakłóceniem	Powierzchnia po zastosowaniu TFPG o wyznaczniku równym:			
			1	2	3	4
Sq, $\mu\text{m}$	0.621	0.685	0.567	0.528	0.481	0.430
Ssk	-2.25	-1.67	-2.04	-2.02	-1.96	-1.80
Sku	8.71	6.86	8.27	8.36	8.26	7.62
Smr, %	64.3	4.46	38.9	47.9	53.4	63.5
Sdq	0.0519	0.1690	0.0438	0.0352	0.0277	0.0216
Sdr, %	0.1340	1.4300	0.0958	0.0619	0.0384	0.0234
Spd, $1/\text{mm}^2$	72.0	1008.0	142.0	91.1	56.4	36.1
Spc, $1/\text{mm}$	0.0053	0.1100	0.0096	0.0070	0.0052	0.0042
Sk, $\mu\text{m}$	0.644	1.170	0.762	0.737	0.704	0.677

Jako pierwszy krok wykonano pomiary topografii powierzchni za pomocą przyrządu optycznego, jakim jest interferometr światła białego, następnie uzupełniono punkty niemierzone, usunięto pojedyncze wierzchołki oraz formę badanych elementów. Następnie wykonano filtrację Gaussowską o długości 0.025 mm. Tak wykonany model powierzchni uzupełniano o wygenerowane zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, dodając je do SGP.

Tabela 2

Parametry stereometrii powierzchni cylindra zawierającego kieszenie smarowe po eliminacji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych za pomocą TFGP

Parametry	Powierzchnia modelowana	Powierzchnia z zakłóceniem	Powierzchnia po zastosowaniu TFGP o wyznaczniku równym:			
			1	2	3	4
Sq, $\mu\text{m}$	1.14	1.18	1.11	1.09	1.06	1.01
Ssk	-2.12	-1.93	-2.15	-2.19	-2.24	-2.28
Sku	9.90	9.05	10.00	10.30	10.50	10.80
Smr, %	0.1950	0.0461	0.1360	0.1360	0.1380	0.1420
Sdq	0.0538	0.1700	0.0504	0.0442	0.0387	0.0338
Sdr, %	0.1440	1.4400	0.1270	0.0975	0.0749	0.0572
Spd, $1/\text{mm}^2$	29.1	277	22.4	16.6	12.9	9.79
Spc, $1/\text{mm}$	0.0131	0.1230	0.0124	0.0096	0.0076	0.0057
Sk, $\mu\text{m}$	0.921	1.370	0.945	0.878	0.835	0.780

Optymalizację procedury doboru sposobu eliminacji zakłóceń wysokoczęstotliwościowych wykonano za pomocą minimalizacji różnic względnych parametrów najbardziej czułych na obecność badanego szumu, uzupełniając je o wybrane parametry, które odgrywają ważną rolę m.in. w doborze sposobu eliminacji krzywizny SGP. W procedurze tej każdemu z parametrów przyporządkowano wagę, odpowiednio: Smr 0.1, Sdq 0.1, Sdr 0.1, Spd 0.2, Spc 0.1 oraz dodane parametry powierzchni: średnie odchylenie średniokwadratowe Sq 0.1, asymetria Ssk 0.1, kurtoza Sku 0.1 oraz głębokość chropowatości rdzenia Sk 0.1.

#### 4. Wyniki badań

Do usuwania zakłóceń wysokoczęstotliwościowych ze struktury geometrycznej powierzchni zaproponowano Transformatę Falkową Pochodnych Gaussowskich. Opracowano procedurę optymalizacji wybranego sposobu ze zwróceniem szczególnej uwagi na różnicę względną parametrów stereometrii powierzchni. Dla powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym proponuje się zastosowanie TFGP o wyznaczniku równym 3, natomiast dla powierzchni cylindra z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami smarowymi najlepszym rozwiązaniem jest zastosowaniem wyznacznika równego 1. Błędny dobór filtracji może spowodować zniekształcenia poszczególnych rys oraz kieszeni smarowych.

## 5. Wnioski – znaczenie badań w dydaktyce metrologii powierzchni

W nauczaniu metrologii powierzchni wykonane badania mają duże znaczenie pod względem nowych technologii oraz sposobów analizy powierzchni wzajemnie ze sobą współpracujących. Błędne użycie filtracji oraz przygotowanie powierzchni do określenia jej właściwości stykowych może całkowicie zmienić pojęcie oraz wiedzę na temat badanych elementów. Zaleca się także poszerzenie wiedzy o wpływie poszczególnych filtrów cyfrowych na zniekształcenia mierzonej powierzchni. Edukacja metrologiczna powinna podążać na bieżąco za ciągle zmieniającą się analizą komputerową. Coraz więcej uwagi poświęca się doborze algorytmów cyfrowych do badania właściwości różnych elementów technicznych. Edukacja metrologiczna stanowi coraz większą część edukacji technicznej oraz informatycznej, będąc połączeniem edukacji techniki oraz edukacji informatyki.

### Literatura

- Jiang X., Whitehouse D.J. (2012), *Technological shifts in surface metrology*, "CIRP Annals – Manufacturing Technology", 61/2.
- Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M. (2011), *Recent trends in surface metrology*, Wear 271.
- Pawlus P., Reizer R., Podulka P., Dobrzański P. (2014), *Comparison of surface topography measurement obtained with optical and stylus methods*, Conference: Coordinate Measuring Techniques 2014.
- Podulka P., Pawlus P., Dobrzański P., *Spikes removal in surface measurements*, J. Phys.: Conf. Ser. 483 012025.
- Rhee H.-G., Vorburger T., Fu J., Renegar T.B., Song J.F. (2005), *Comparison of roughness measurements obtained with optical and stylus techniques*, 10th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Saint-Etienne.
- Schmit J., Olszak A. (1994), *High-precision shape measurement by white-light interferometry with real time scanned correction*, "Applied Optics", 33.
- Whitehouse D. (2011), *Surface metrology today: complicated, confusing, effective*, Proceedings of the 13th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Twickenham Stadium, UK, 2011, 1–10.

### Streszczenie

W pracy przedstawiono procedurę eliminacji zakłóceń pomiarowych ze struktury geometrycznej powierzchni elementów silników spalinowych. Badano powierzchnie cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz po wygniataniu kieszeni olejowych. Analizowano parametry z normy ISO-25178. Do rozwiązania problemu zastosowano Transformację Falkową Pochodnych Gaussowskich. Określono także wpływ wyników badań na postępy w edukacji z zakresu metrologii.

**Słowa kluczowe:** topografia powierzchni, Transformata Falkowa, zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, metrologia powierzchni.

## **The high-frequency noise removal from the surface topography of cylinder liners using Differential of Gaussian Wavelet**

### **Abstract**

In this article the removal of high-frequency noise from the surface topography of cylinder liners was presented. The plateau-honed cylinders as well as cylinder liners with additionally added oil pockets were analysed and the parameters from ISO-25178 standard were processed. The Differential of Gaussian Wavelet was used as the possibility of problem solution. The influence of obtained results on metrology education was also found.

**Key words:** surface topography, wavelet transform, high-frequency noise, surface metrology.