

## **Wpływ pojedynczych wierzchołków struktury geometrycznej powierzchni na usuwanie zarysu kształtu metodą aproksymacji wielomianowej**

### **Wprowadzenie – problemy przy pomiarze struktury geometrycznej powierzchni interferometrem światła białego**

Badając właściwości stykowe powierzchni wzajemnie ze sobą współpracujących, analizuje się strukturę geometryczną powierzchni (SGP). SGP jest zbiorem wszystkich nierówności powierzchni rzeczywistej, złożoną z trzech składników: odchyłki kształtu, falistości oraz chropowatości powierzchni. Dzięki analizie SGP można także określić występowanie oraz rodzaj zużycia.

Do powszechnie stosowanych metod badania topografii powierzchni elementów silników spalinowych należą pomiary: profilometrem stykowym, mikroskopem konfokalnym, interferometrem światła białego.

Pomiar metodami optycznymi jest wysoce wydajny pod względem małej ilości czasu w porównaniu z pomiarem stykowym. Podczas pomiarów interferometrem światła białego powstają jednak błędy, do których należą: zakłócenia wysokoczęstotliwościowe oraz pojedyncze wierzchołki zwane także szpilkami.

Zazwyczaj analizuje się strukturę geometryczną powierzchni po usunięciu jej zarysu kształtu oraz falistości. Do sposobów eliminacji zarysu kształtu oraz falistości stosowana jest aproksymacja wielomianowa. Na dokładność usuwania formy ze SGP wpływają zakłócenia typu pojedyncze wierzchołki.

Nieprawidłowa eliminacja kształtu w badaniu SGP rzutuje na błędne oszacowanie właściwości stykowych powierzchni. Dla cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz wygniataciu kieszeni olejowych może to spowodować fałszywe oszacowanie pojemności olejowej. Wówczas prawidłowo wykonany element może być zakwalifikowany jako brak i zostać odrzucony.

### **1. Badane materiały oraz metody cyfrowe**

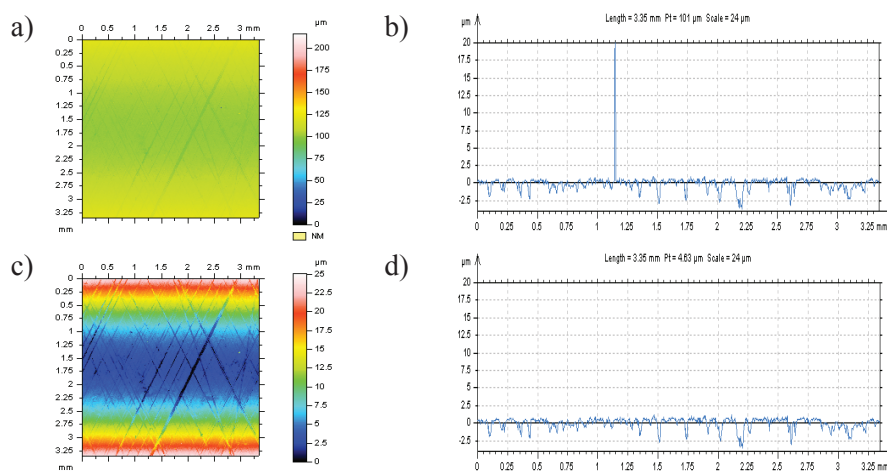
Badanymi powierzchniami były cylindry silnika spalinowego po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz cylindry po gładzeniu płasko-wierzchołkowym i po wygniataciu kieszeni olejowych. Przebadano 20 powierzchni. Analizowano parametry zawarte w normie ISO-25178, zwracając szczególną uwagę na parametry z rodziny Sk. Urządzeniem pomiarowym analizowanych powierzchni cylindra był interferometr światła białego Talysurf CCI Lite. Rozmiar badanych

powierzchni to: 3.35 x 3.35 mm (1024 x 1024 punkty), krok próbkowania względem osi x oraz y 3.27 $\mu$ m, oś z 0.01nm.

Algorytmy cyfrowe, symulacje powierzchni oraz profilów wykonano za pomocą programu Matlab, wersja R2012a (numer licencji: 663409). Parametry stereometrii powierzchni określone zostały za pomocą programu TalyMap Topography XT, włączonego do obsługi profilometru, który został użyty do pomiaru badanych powierzchni.

## 2. Wpływ szpilek SGP na parametry stereometrii powierzchni podczas usuwania zarysu kształtu cylindrów silników spalinowych

Występowanie pojedynczych wierzchołków w strukturze geometrycznej powierzchni może mieć znaczący wpływ zarówno na parametry powierzchni, jak i na sposób eliminacji zarysu kształtu. Do sposobów eliminacji formy ze SGP powszechnie stosuje się aproksymację wielomianową.

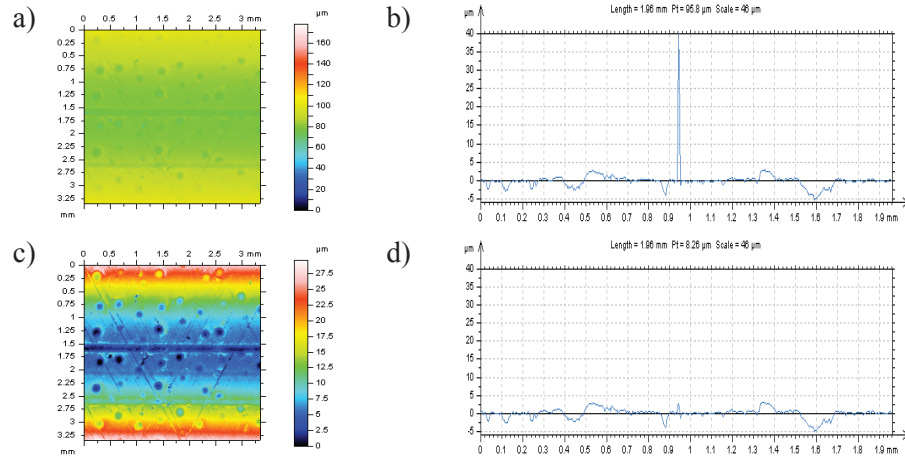


**Rys. 1. Widok izometryczny (a, c) oraz profile powierzchni (b, d) cylindra pomierzonej (a, b) oraz po eliminacji szpilek (c, d)**

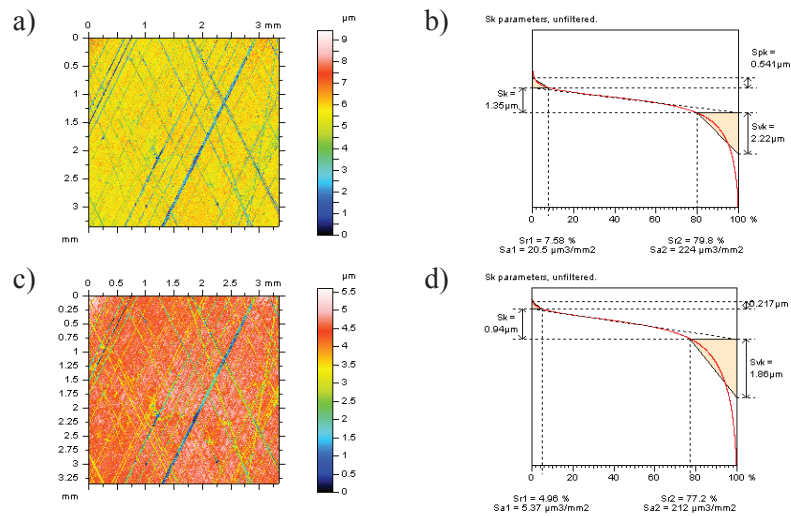
Na rys. 1 przedstawiono widoki izometryczne powierzchni pomierzonej (a, c) oraz po eliminacji pojedynczych wierzchołków (b, d) za pomocą odcięcia materiałowego o wartości 99,87%. Występowanie pojedynczych wierzchołków powoduje także utrudnienia w analizie wzrokowej elementu (rys. 1a). Szpilkę łatwo zauważyć poprzez wyodrębnienie profilów z powierzchni (rys. 1b, d). Dla powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz po losowym wygniataniu kieszeni smarowych ciężiej jest także analizować wizualnie wybrane komponenty jak kieszenie olejowe.

Na rys. 2 ukazano powierzchnię oraz profil powierzchni cylindra przed (a, b) oraz po (c, d) usunięciu szpilek. Dla powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-

wierzchołkowym kształt usuwano za pomocą wielomianów 3. oraz 4. stopnia. Natomiast dla powierzchni cylindra zawierających dodatkowo wygniatane kieszenie smarowe stosowano wielomiany rzędów 2. oraz 3. Dobór stopnia wielomianu uzasadniony został już we wcześniejszych badaniach doboru powierzchni odniesienia w usuwaniu zarysu kształtu struktury geometrycznej dla powierzchni cylindrycznych.



**Rys. 2. Widok izometryczny (a, c) oraz profile powierzchni cylindra (b, d) po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz po losowym wygniataniu kieszeni olejowych przed (a, b) oraz po eliminacji szpilek (c, d)**



**Rys. 3. Widok izometryczny (a, c) oraz krzywa udziału materiałowego (b, d) powierzchni cylindra po usunięciu zarysu kształtu wielomianem stopnia 3. dla powierzchni zawierającej szpilki (a, b) oraz po ich eliminacji (c, d)**

Poprzez analizę widoków powierzchni cylindra po usunięciu odchyłki kształtu za pomocą wielomianu 3. stopnia już zauważa się pewne różnice (rys. 3). Także i wysokość powierzchni różni się znacznie (odpowiednio 9 $\mu$ m oraz 5 $\mu$ m).

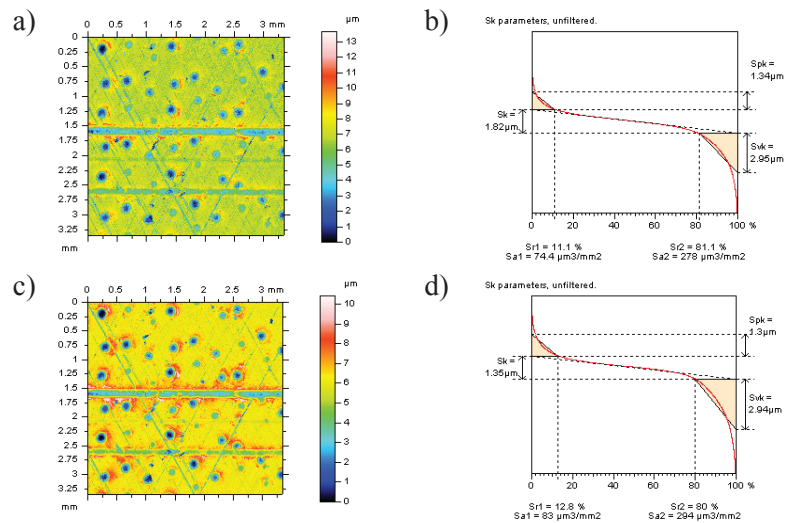
Tabela 1

Parametry stereometrii powierzchni cylindra zawierającej szpilki oraz po ich eliminacji dla usuwania zarysu kształtu wielomianami 3. i 4. stopnia

Parametry	Powierzchnia zawierająca szpilki		Powierzchnia po eliminacji szpilek	
	wielomian 3. stopnia	wielomian 4. stopnia	wielomian 3. stopnia	wielomian 4. stopnia
Sq, $\mu$ m	0.989	0.989	0.791	0.789
Ssk	-1.97	-1.96	-2.23	-2.22
Sku	8.34	8.32	8.81	8.77
Sp, $\mu$ m	3.99	3.98	1.39	1.35
Sv, $\mu$ m	5.45	5.45	4.21	4.19
Sz, $\mu$ m	9.44	9.44	5.6	5.53
Sa, $\mu$ m	0.678	0.679	0.543	0.542
Sal, mm	0.0262	0.0262	0.0238	0.0231
Str	0.0155	0.0155	0.0141	0.0139
Std, $^{\circ}$	63.6	63.6	63.6	63.6
Sdq	0.232	0.232	0.132	0.132
Sdr, %	2.6	2.6	0.859	0.858
Spd, 1/mm <sup>2</sup>	1129	1128	859	872
Spc, 1/mm	0.131	0.131	0.0669	0.0664
Sk, $\mu$ m	1.35	1.37	0.940	0.941
Spk, $\mu$ m	0.541	0.543	0.217	0.206
Svk, $\mu$ m	2.22	2.22	1.86	1.85
Sr2, %	79.8	79.9	77.2	77.2

Zastosowanie 3. oraz 4. stopnia wielomianu do usuwania zarysu kształtu dla powierzchni zawierających szpilki nie przyniosło znaczących zmian w parametrach stereometrii powierzchni (tabela 1). Jakikolwiek zmiany zanotowano tylko dla wybranych parametrów. Jednak porównanie tychże metod do usuwania kształtu wielomianami 3. oraz 4. Stopnia, ale dla powierzchni po eliminacji pojedynczych wierzchołków daje znaczące różnice. Parametry amplitudowe ulegają następującym zmianom: Sq maleje o 21%, Ssk o 12%, Sku rośnie o 6%. Dużym zmianom ulegają parametry: Sp maleje o 187%, Sv o 49%, Sz o 68%, Sa – 28%. Parametry funkcyjne Sal oraz Str maleją około 10%, natomiast parametr Std nie ulega zmianom. Parametr Sdq maleje o 75%, natomiast Sdr

o 202%. Parametry cech dotyczące wierzchołków: Spd oraz Spc maleją odpowiednio 31% oraz 95%. Dużym zmianom uległy także parametry z grupy Sk, zmalały następująco: Sk o 44%, Spk o 149%, Svk o 20% oraz Sr2 o 4%.



**Rys. 4. Widok izometryczny (a, c) oraz krzywa udziału materialowego (b, d) powierzchni cylindra po gładzeniu płasko-wierzchołkowym i zawierającego kieszenie smarowe po usunięciu zarysu kształtu wielomianem stopnia 2. dla powierzchni zawierającej szpilki (a, b) oraz po ich eliminacji (c, d)**

Badaniom poddano także powierzchnie cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz wygniataaniu kieszeni olejowych. Podczas analizy widoku izometrycznego powierzchni (rys. 4) łatwo dostrzec różnice w wygładzie powierzchni. Poszczególne jej elementy nie ulegają zmianie, jednak już chociażby maksymalna wysokość jest różna (dla powierzchni ze szpilkami podczas usuwania zarysu kształtu wynosi ponad 13 μm, a dla powierzchni bez szpilek nieco ponad 10 μm).

Podobnie jak dla cylindrów bez wygniataanych kieszeni smarowych zastosowanie wielomianów drugiego oraz trzeciego stopnia do usuwania zarysu kształtu nie powoduje dużych zmian względnych parametrów przy występowaniu pojedynczych wierzchołków (tabela 2). Jednak także i tutaj porównanie tych samych metod przy wcześniejszej eliminacji pojedynczych wierzchołków daje znacznie większe różnice w parametrach stereometrii powierzchni. Parametry amplitudowe zmieniały się w następujący sposób: parametr Sq wzrósł 8%, Ssk o 14%, natomiast parametr Sku zmalał o 5%, a pozostałe wzrosły – Sp o 58%, Sv o 11%, Sz o 32% oraz Sa o 11%. Parametry funkcyjne Sal oraz Str wzrosły odpowiednio 51% oraz 5%, natomiast parametr Std zmalał 10%. O 143% wzrosła gęstość wierzchołków (parametr Spd), a o 75% wzrósł parametr Spc.

Tabela 2

Parametry stereometrii powierzchni cylindra z wygniatanymi kieszeniami olejowymi zawierającego szpilki oraz po ich eliminacji dla usuwania zarysu kształtu wielomianami 2. oraz 3. stopnia

Parametry	Powierzchnia zawierająca szpilki		Powierzchnia po eliminacji szpilek	
	wielomian 2. stopnia	wielomian 3. stopnia	wielomian 2. stopnia	wielomian 3. stopnia
Sq, $\mu\text{m}$	1.24	1.24	1.34	1.34
Ssk	-1.45	-1.44	-1.27	-1.26
Sku	7.12	7.11	6.79	6.79
Sp, $\mu\text{m}$	4.44	4.43	7.02	7.03
Sv, $\mu\text{m}$	5.98	5.96	6.65	6.67
Sz, $\mu\text{m}$	10.4	10.4	13.7	13.7
Sa, $\mu\text{m}$	0.811	0.812	0.906	0.907
Sal, mm	0.0655	0.0655	0.129	0.128
Str	0.663	0.663	0.700	0.695
Std, $^{\circ}$	0.0647	0.0644	0.0589	0.0582
Sdq	0.129	0.129	0.223	0.223
Sdr, %	0.824	0.824	2.41	2.41
Spd, $1/\text{mm}^2$	270	272	655	650
Spc, $1/\text{mm}$	0.0871	0.087	0.152	0.153
Sk, $\mu\text{m}$	1.35	1.38	1.82	1.82
Spk, $\mu\text{m}$	1.3	1.28	1.34	1.33
Svk, $\mu\text{m}$	2.94	2.92	2.95	2.93
Sr2, %	80	80.1	81.1	81.1

Dużym zmianom uległ parametr Sk, ponieważ wzrósł o 75%. Natomiast znacznie mniejszym zmianom, w porównaniu z cylindrami bez wygniatanych kieszeni smarowych, uległy pozostałe parametry funkcyjne: Spk, Svk oraz Sr2 wzrosły odpowiednio o 3%, 1% oraz 2%.

### 3. Wyniki badań

Badanie struktury geometrycznej powierzchni ma znaczący wpływ na określenie wartości zużycia elementów wzajemnie ze sobą współpracujących. Błędne oszacowanie właściwości stykowych może doprowadzić do zakwalifikowania prawidłowo wykonanego elementu jako braku oraz do jego odrzucenia.

Jednym z kroków analizy topografii powierzchni jest eliminacja jej odchyłki kształtu. W pracy ukazano błędny sposób usuwania zarysu kształtu za pomocą aproksymacji wielomianowej. Wpływ na dobór metody cyfrowej miało występowanie pojedynczych wierzchołków struktury geometrycznej powierzchni powstałych podczas jej pomiaru interferometrem światła białego. Samo pojawienie się tego typu elementów dla powierzchni po gładzeniu płasko-wierzchołkowym jest błędem urządzenia pomiarowego i powoduje znaczne zmiany w parametrach stereometrii powierzchni.

W pracy określono także wpływ występowania pojedynczych wierzchołków SGP na parametry stereometrii powierzchni cylindrów silników spalinowych podczas usuwania odchyłki kształtu metodą aproksymacji wielomianowej. Podczas badania powierzchni cylindrów po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz wygniataniu kieszeni olejowych zaleca się przed dokonaniem usuwania zarysu kształtu dokonać eliminacji pojedynczych wierzchołków.

#### **4. Wnioski – poszerzenie wiedzy dydaktycznej z zakresu problemów pomiarowych powierzchni urządzeniami optycznymi**

Dydaktyka metrologii ewoluuje w kierunku ciągłego rozwoju analizy komputerowej wybranych elementów maszyn. Obecnie bada się nie pojedyncze profile powierzchni, jednak traktuje się ją jako całość, analizując w wymiarach izometrycznych. Zajmując się stykiem elementów silników spalinowych, mierzy się ich strukturę geometryczną, kładąc nacisk na styk całej powierzchni.

Nowe trendy w analizie topografii powierzchni wyznaczają przed edukacją potrzebę ciągłej zmiany przekazywanego materiału. Coraz więcej jest cyfrowych sposobów badania powierzchni, jednak wiele z nich wymaga zmian z zakresu ich unormowania. Wiele problemów leży po stronie przekazu wiedzy metrologicznej, zarazem w brakach odpowiednich wskazań, jak stosować odpowiednie algorytmy.

W pracy poruszono problem wpływu pojedynczych wierzchołków topografii powierzchni na procedurę eliminacji formy ze struktury geometrycznej powierzchni. Wyniki te mogą być wskazówką dla dydaktyków, jak stosować analizę cyfrową do problemów występujących podczas pomiaru topografii powierzchni za pomocą powszechnie dzisiaj stosowanych urządzeń optycznych.

#### **Literatura**

- Blunt L., Jiang X. (2003), *Numerical parameters for characterization of topography* [in:] *Assessment surface topography*, eds. L. Blunt, X. Jiang, Kogan Page Science, London and Sterling.
- Leach R. (2013), *Characterization of areal surface texture*, Springer.
- Łukianowicz C., Tomkowski R. (2009), *Analysis of topography of engineering surfaces by white light scanning interferometry*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Rzeszow, Poland.

- Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M. (2011), *Recent trends in surface metrology*, Wear 271.
- Pawlus P. (2007), *Topografia powierzchni*, Rzeszów.
- Podulka P., Dobrzański P., Pawlus P., Lenart A. (2014), *The effect of reference plane on values of areal surface topography parameters from cylindrical elements*, "Metrology and Measurement Systems", 2.
- Podulka P., Pawlus P., Dobrzański P., *Spikes removal in surface measurements*, J. Phys.: Conf. Ser. 483 012025.
- Raja J., Muralikrishnan B., Shengyu Fu (2002), *Recent advances in separation of roughness, waviness and form*, "Precision Engineering", 26.
- Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J. (2008), *Surface topography representation in profilometry*, Rzeszów.

### **Streszczenie**

Artykuł zawiera opis wpływu pojedynczych wierzchołków struktury geometrycznej powierzchni na usuwanie zarysu kształtu za pomocą metody aproksymacji wielomianowej. W pracy badano powierzchnie cylindrów silników spalinyowych po gładzeniu płasko-wierzchołkowym oraz po wygniataniu kieszeni olejowych. Określono także wpływ szpilek na parametry stereometrii powierzchni podczas eliminacji odchyłki kształtu.

**Słowa kluczowe:** struktura geometryczna powierzchni, cylindry silników spalinyowych, pojedyncze wierzchołki, aproksymacja wielomianowa.

### **Spikes influence on polynomial form removal in surface topography**

#### **Abstract**

In the article the influence of spikes on the surface topography areal form removal by polynomial approximation was presented. The cylinder liners after plateau-honing and plateau-honing with additionally added oil pockets were studied. The impact of spikes on the surface topography parameters (from ISO-25178 standard) while form removal was also described.

**Key words:** surface topography, cylinder liners, spikes, polynomial form removal.