

# Modelowanie profili nierówności powierzchni cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym

Rafał Reizer\*, Paweł Pawlus\*\*

\*Instytut Techniki, Uniwersytet Rzeszowski

\*\*Katedra Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji, Politechnika Rzeszowska

**Streszczenie:** W pracy podjęto próbę modelowania profili nierówności powierzchni cylindrów z wykorzystaniem metody dopasowania krzywych Johnsona. Ponadto zastosowano modelowanie przy pomocy algorytmu nakładania profili o normalnym rozkładzie rzędnych. Ocenę jakości dopasowania profili modelowych do profili mierzonych przeprowadzono na podstawie porównań wyselekcjonowanych parametrów.

**Słowa kluczowe:** struktura geometryczna powierzchni, cylinder, gładzenie, modelowanie

## 1. Wprowadzenie

W nowoczesnych technikach wytwarzania podstawowym celem jest uzyskanie dobrej jakości wyrobów, powiązanej z jakością warstwy wierzchniej przedmiotów obrobionych. Stwierdzono, że istnieją silne związki między stanem warstwy wierzchniej, a zdolnością do spełniania różnorodnych wymagań eksploatacyjnych przez części maszyn. Obecny stan wiedzy nie zawsze pozwala na jednoznaczne skorelowanie SGP (struktury geometrycznej powierzchni) z późniejszymi cechami eksploatacyjnymi części maszyn. Jedną z przyczyn są trudności w otrzymaniu SGP o zróżnicowanych cechach geometrycznych. Dynamiczny rozwój takich dziedzin nauki, jak podstawy konstrukcji maszyn, materiałoznawstwo, tribologia, mechanika płynów pozwala na modelowanie zjawisk tarcia i zużycia (np. z zastosowaniem metody elementów skończonych), co pozwala na zmniejszenie kosztów i czasu żmudnych badań doświadczalnych. Modelowanie SGP o różnej charakterystyce może przyczynić się do jednoznacznego określenia wpływu mikrogeometrii powierzchni części maszyn na właściwości funkcjonalne skojarzeń trących w danych warunkach pracy. Szczególne znaczenie należy przypisać badaniom powierzchni noszących ślady kilku procesów. Przykładem takiej powierzchni jest powierzchnia cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym. Łączy ona w sposób idealny dobre właściwości ślizgowe powierzchni gładkich z dużą zdolnością do gromadzenia oleju przez powierzchnie porowate. Analizie struktury geometrycznej powierzchni (SGP) cylindrów poświęca się ostatnio wiele uwagi. Jest to związane z wpływem gładzi cylindrowej na emisję składników toksycznych do atmosfery [1, 2]. Dlatego opracowanie metod modelowania SGP cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym może mieć istotne znaczenie praktyczne.

Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni jest dziedziną inżynierii powierzchni o dużej perspektywie rozwoju. Obecnie modelowanie znajduje się nadal w fazie badań,

zaś różnorodność i złożoność SGP jest poważnym utrudnieniem szerokiego stosowania modelowania w praktyce. Można wyodrębnić dwa zasadnicze sposoby podejścia do modelowania SGP. Pierwszym z nich jest modelowanie nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni. Stosowanie takiego modelowania może zapewnić bardzo dobre przybliżenie powierzchni modelowanych do powierzchni rzeczywistych. Sposób ten zapewnia również możliwości generowania powierzchni o specyficznych kształtach, trudnych do uzyskania w rzeczywistych warunkach technicznych, lecz przydatnych podczas eksploatacji skojarzeń materiałowych w określonych warunkach.

Drugim sposobem jest modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni. Zapewnia możliwości analizowania wpływu warunków kształtowania technologicznego i eksploatacyjnego na strukturę geometryczną powierzchni elementów maszyn. Zazwyczaj przybliżenie powierzchni modelowych do rzeczywistych jest gorsze, niż w metodzie pierwszej.

Oba podejścia modelowania mogą się do siebie zbliżać, np. gdy pierwszy sposób uwzględnia powierzchnie otrzymane w określony sposób. W niniejszej pracy zostanie zastosowana metoda pierwsza.

Generowanie komputerowe powierzchni losowej wymaga informacji o jej cyfrowej charakterystyce. Metody modelowania profili można podzielić na generowanie profili o normalnym rozkładzie rzędnych i o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego. Stosuje się też generowanie komputerowe powierzchni fraktalnych. Pierwszą czynnością w obu przypadkach jest zazwyczaj generowanie wysokości z generatora sygnałów pseudolosowych.

Wcześniejsze prace dotyczące modelowania powierzchni o normalnym rozkładzie rzędnych opierały się na analizie szeregów czasowych (ARMA). Dla opisu szeregów czasowych, w których operacje są zależne, stosowane są modele stochastyczne. Bazują one na pomysle, że szereg czasowy, w którym kolejne wartości są silnie zależne, można traktować jako szereg generowany przez ciąg niezależnych impulsów  $a_t$  (zwany białym szumem). Przykładami mogą być prace [3, 4].

Uważa się, że stosowane metody ARMA niskich rzędów potrafią zachować cechy funkcji autokorelacji tylko blisko jej początku. Dlatego często stosuje się szybką transformatę Fouriera w celu generowania powierzchni 3D i profili 2D o znanej funkcji autokorelacji lub widmowej gęstości mocy. Można wykorzystać metodyki stosowane przez Hu i Tondera [5], Newlanda [6] i Wu [7]. Autorzy niniejszej pracy stwierdzili, że stosowanie metod Newlanda i Wu zapewnia korzystniejsze wyniki w porównaniu z procedurą opracowaną przez Hu i Tondera.

Do modelowania SGP o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego stosuje się często metodę translacyjną Johnsona, wykorzystującą system Pearsona krzywych częstotliwościowych [8]. Pozwala on na otrzymanie nieskorelowanych liczb o zadanej wartości funkcji autokorelacji. Metodę tę zastosowali autorzy prac [9, 10]. Możliwością modelowania struktury dwuprocesowej jest nakładanie na siebie dwóch rozkładów normalnych. Procedura polega na wyborze mniejszych rzędnych z tych dwóch rozkładów. Opiera się ona na normie ISO 13565-3 [11, 12].

## 2. Opis stosowanych algorytmów

Zastosowano dwie metody: nakładania profilu i transformaty Johnsona. Obie metody wykorzystują modelowanie profilu o normalnym rozkładzie rzędnych. Dlatego zostanie ona omówiona na początku. Zastosowano algorytm zaprezentowany w pracy [7]. Danymi wejściowymi niezbędnymi do działania tego algorytmu były następujące parametry modelowanego profilu nierówności:

- $P_q$ ,
- długość korelacji  $\beta$  (długość odcinka, na której funkcja autokorelacji zmniejsza się do wartości 0.1).

Pierwszym krokiem działania tego algorytmu było określenie kształtu „kołowej” funkcji autokorelacji modelowanej powierzchni z wykorzystaniem długości korelacji oraz parametru  $P_q$ . Kształt „kołowej” funkcji autokorelacji opisany jest równaniem wykładniczym postaci:

$$R_c(k) = C_c(k) = P_q \left[ \left( \frac{n-k}{n} \right) \cdot \exp\left(\frac{-2.3 \cdot k}{\beta}\right) + \left( \frac{k}{n} \right) \cdot \exp\left(\frac{-2.3 \cdot (n-k)}{\beta}\right) \right] \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – krok,  $\beta$  – długość korelacji,  $n=0, 1, 2, \dots$

Przy pomocy wygenerowanego kształtu funkcji autokorelacji obliczono widmową gęstość mocy  $S_z$ . Podstawiając do poniższego wzoru, wygenerowano profil o określonej długości korelacji

$$z_t = \sum_{k=0}^{n-1} \sqrt{S_z} \cdot \exp\left(i2\pi \left[ \phi_k + \frac{kt}{n} \right]\right) \quad (2)$$

gdzie:  $t=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ , zaś  $\phi_k$  jest zestawem niezależnych losowych kątów fazowych rozłożonych jednolicie pomiędzy kątem 0 a  $2\pi$ .

Danymi wejściowymi niezbędnymi do działania procedury nakładania profilu o normalnych rozkładach rzędnych (zwanej PR) były następujące parametry modelowanego profilu nierówności:

- $P_q$ ,
- długość korelacji  $\beta$ ,
- oczekiwana skośność profilu  $P_{sk}$ ,
- wartość parametru  $P_{mq}$ ,
- wartość parametru  $P_{pq}$ ,
- wartość parametru  $P_{vq}$ .

Parametry  $P_{pq}$ ,  $P_{vq}$  i  $P_{mq}$  opisane są w normie ISO 13565-3.

Na początku działania algorytmu, stosując opisaną wcześniej metodę, wygenerowano grupę profili pierwotnych

i wtórnych o normalnym rozkładzie rzędnych i różnych długościach korelacji, oraz o następujących parametrach:

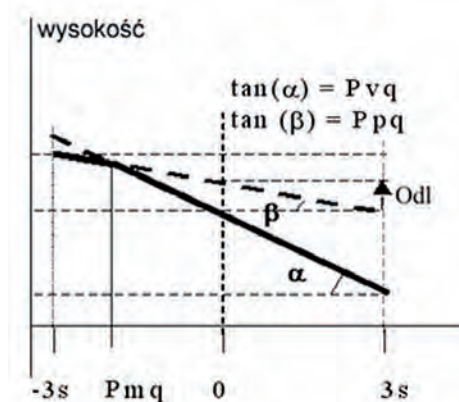
- profil podstawowy ( $P_q = P_{vq}$ ),
- profil wtórny ( $P_q = P_{pq}$ ).

Po uśrednieniu obu profili obliczono odległość między jednym i drugim profilem z zależności:

$$Odl = P_{mq}(P_{pq} - P_{vq}) \quad (\text{rys. 1}) \quad (3)$$

Następnie składano ze sobą wygenerowane wcześniej profile o symetrycznym rozkładzie rzędnych w odległości  $Odl$ . Porównano poszczególne rzędne profilu i wybrano wartości mniejsze. Następnie obliczono długość korelacji nowego profilu. Jeśli długość korelacji mieściła się w granicach tolerancji założonych na początku działania algorytmu ( $\delta\Delta\kappa$ ), wykonywano następny krok algorytmu. Jeśli długość korelacji nie mieściła się w granicach tolerancji, wybierano kolejny losowy profil i składano go ponownie, aż do uzyskania długości korelacji założonej na początku.

W kolejnym kroku, obliczano skośność  $P_{sk}$  profilu. Jeśli mieściła się ona w granicach tolerancji ( $\delta P_{sk}$ ), kończono działanie algorytmu uzyskując profil o asymetrycznym rozkładzie rzędnych, wymaganej skośności oraz długości korelacji. W przeciwnym przypadku wracano do początku algorytmu i pobierano nowy profil do złożenia. Wartości tolerancji  $\delta Dk$  ( $\pm 1 \mu\text{m}$ ) i  $\delta P_{sk}$  ( $\pm 0,5$ ) określono w wyniku badań wstępnych.



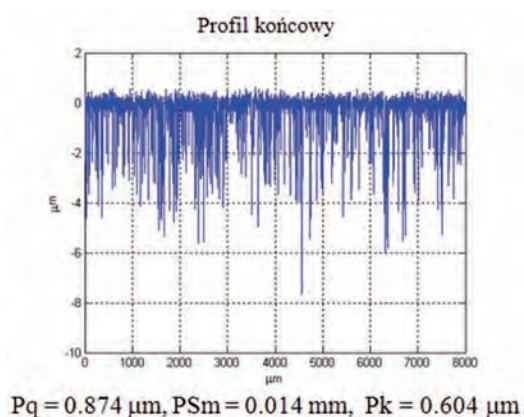
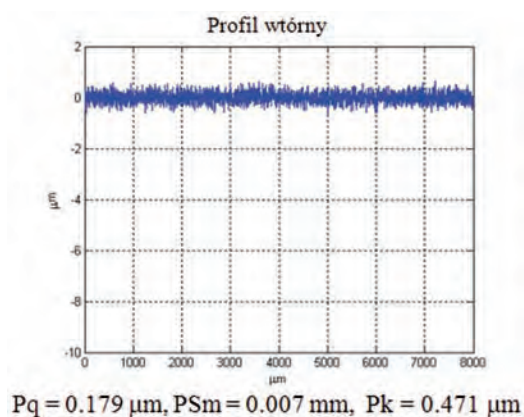
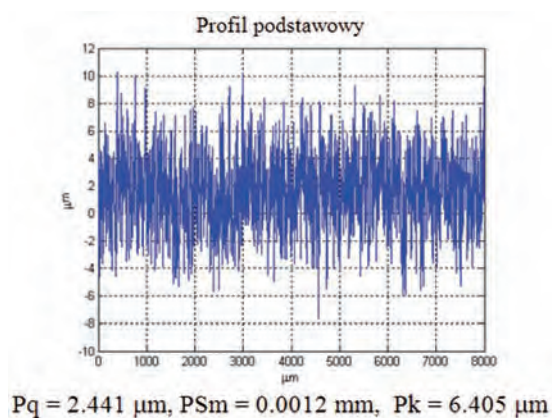
**Rys. 1.** Powiązania między parametrami profili dwuprocesowych  
**Fig. 1.** Connections between 2-process profiles parameters

Na rys. 2 przedstawiono profile o normalnym rozkładzie rzędnych (podstawowy i wtórny) oraz parametry profilu końcowego (dwuprocesowego) wraz z wybranymi parametrami.

Danymi wejściowymi algorytmu działającego w oparciu o przekształcenie Johnsona były:

- długość korelacji  $\beta$ ,
- wartość parametru  $P_a$ ,
- oczekiwana skośność profilu  $P_{sk}$ ,
- oczekiwana kurtoza profilu  $P_{ku}$ .

Na początku działania algorytmu, przy pomocy metody szybkiej transformaty Fouriera [7], został wygenerowany profil o normalnym rozkładzie rzędnych o założonej długości korelacji. W kolejnym kroku, wykorzystując algorytm AS 99 zamieszczony w pracy [8], określono równanie systemu krzywych częstotliwościowych dla wprowadzonych da-



**Rys. 2.** Profile o normalnym rozkładzie rzędnych (podstawowy i wtórny), profil końcowy (dwuprocesowy)

**Fig. 2.** Profiles of normal ordinate distribution (primary and secondary), final profile (after 2-processes)

nych (tj.  $P_a$ ,  $P_{Sk}$ ,  $P_{ku}$ ). Podstawiając do uzyskanego równania wartości rzędnych profilu wygenerowanego na początku algorytmu, uzyskano profil o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego oraz wartościach parametrów  $P_a$ ,  $P_{Sk}$ ,  $P_{ku}$  i  $\beta$  zbliżonych do wartości założonych na początku programu. Metodę tę nazwano PJ, jest to nowe podejście do stosowania algorytmu Johnsona w porównaniu z pracami [5, 9, 10].

Programy modelowania profili nierówności opracowano w środowisku MATLAB.

### 3. Cel i zakres badań

Celem badań było porównanie dwóch metod modelowania profili nierówności dwuprocesowych (o warstwowych właściwościach funkcjonalnych) wraz z wyborem najlepszej z nich. Obiektem badań były tuleje cylindryczne z żeliwa. Materiałem wyjściowym tulei cylindrycznych było żeliwo szare perlityczne z eutektyką fosforową wyraźnie ukształtowaną. Do prób gładzenia wykończeniowego i ostatecznego użyta została gładzarka niemieckiej firmy Gehring. Chłodziwem była ciecz HON 15. Zastosowano osetki z warstwą diamentową (metoda „glide”) oraz osetki o spoiwie ceramicznym. Pomiaru chropowatości cylindrów w układzie 2D dokonano z użyciem przyrządu pomiarowego MarSurf XR 20 firmy Mahr. Promień zaokrąglenia końcówki pomiarowej wynosił 2  $\mu\text{m}$  (bez ślizgacza), kąt końcówki pomiarowej 90°, siła nacisku 1 mN, prędkość pomiarowa 0,5 mm/s, niepewność pomiaru wynosiła 5 %. Analizowano profile wypoziomowane określone na odcinku pomiarowym o długości 17,5 mm. Przedmiotem analizy były profile 20 powierzchni tulei mierzone wzdłuż tworzącej. Na podstawie analiz wstępnych porównywano wartości następujących parametrów profili nierówności powierzchni mierzonych i modelowanych tulei cylindrycznych przy pomocy metod PR i PJ:  $P_a$ ,  $P_q$ ,  $P_{Sk}$ ,  $P_{ku}$ ,  $P_{Sm}$ ,  $P_{dq}$  (z normy ISO 4287) oraz  $P_k$ ,  $P_{pk}$  i  $P_{vk}$  z normy ISO 13565-2.

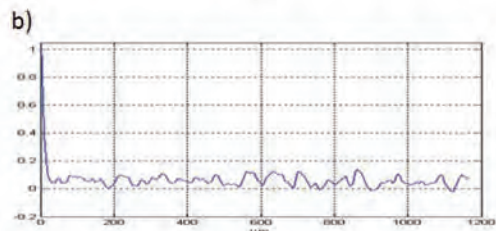
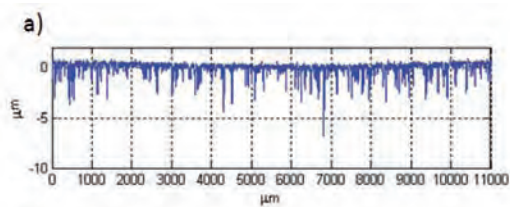
### 4. Wyniki badań i ich analiza

Wartości wybranych parametrów profili modelowanych porównywano z parametrami profili mierzonych. Tablice 1 i 2 przedstawiają wartości średnich wartości absolutnych błędów względnych i bezwzględnych określenia wybranych parametrów profili pierwotnych po zastosowaniu modelowania metodą nakładania profili (PR) oraz metodą przekształcenia Johnsona (PJ).

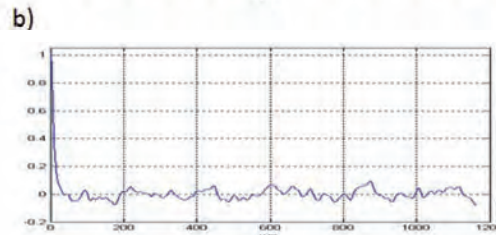
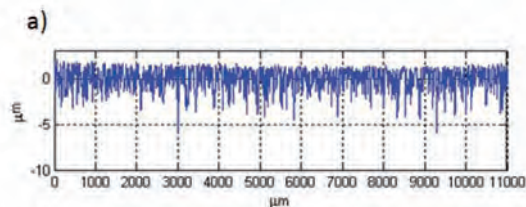
**Tab. 1.** Parametry modelowane metodą PR

**Tab. 1.** Parameters modeled by PR method

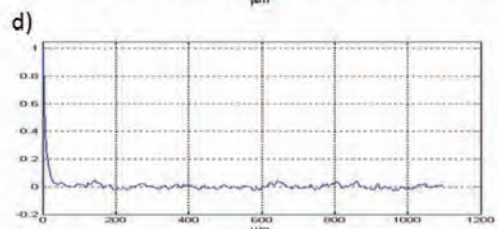
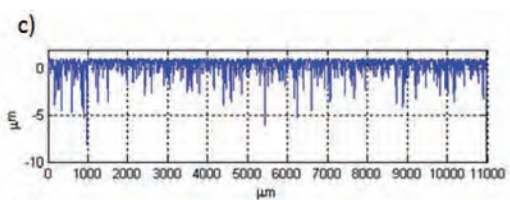
Metoda modelownia	PR	
	błąd względny, %	błąd bezwzględny
$P_a$	11,47	0,07 $\mu\text{m}$
$P_q$	11,72	0,09 $\mu\text{m}$
$P_{Sk}$	12,8	0,26
$P_{ku}$	14,02	1,62
$P_{Sm}$	9,33	0,01 mm
$P_{dq}$	15,16	1,39°
$P_k$	27,5	0,30 $\mu\text{m}$
$P_{vk}$	8,54	0,16 $\mu\text{m}$
$P_{pk}$	74,5	0,16 $\mu\text{m}$



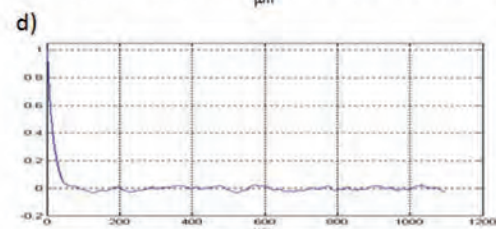
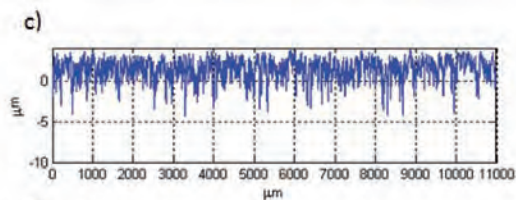
$Pq = 0,679 \mu\text{m}$ ,  $Psk = -2,957$ ,  $Pku = 16,088$ ,  $Psm = 0,034 \text{ mm}$ ,  $Pdq = 7,24^\circ$ ,  
 $Pk = 0,698 \mu\text{m}$ ,  $Ppk = 0,154 \mu\text{m}$ ,  $Pvk = 1,684 \mu\text{m}$



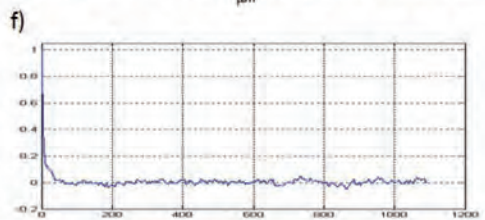
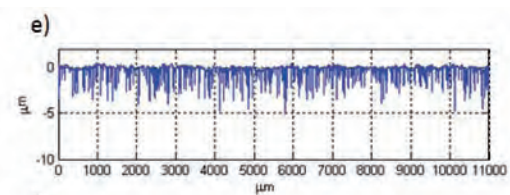
$Pq = 1,161 \mu\text{m}$ ,  $Psk = -1,059$ ,  $Pku = 4,24$ ,  $Psm = 0,038 \text{ mm}$ ,  $Pdq = 11,465^\circ$ ,  
 $Pk = 2,438 \mu\text{m}$ ,  $Ppk = 0,259 \mu\text{m}$ ,  $Pvk = 1,816 \mu\text{m}$



$Pq = 0,686 \mu\text{m}$ ,  $Psk = -3,042$ ,  $Pku = 18,705$ ,  $Psm = 0,044 \text{ mm}$ ,  $Pdq = 5,83^\circ$ ,  
 $Pk = 0,725 \mu\text{m}$ ,  $Ppk = 0,027 \mu\text{m}$ ,  $Pvk = 1,42 \mu\text{m}$



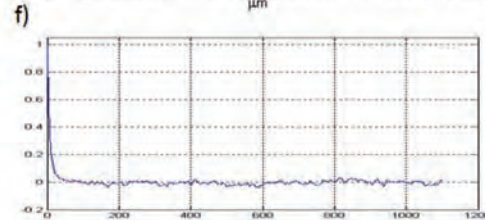
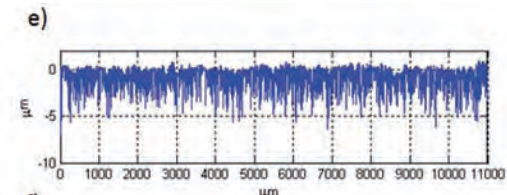
$Pq = 1,211 \mu\text{m}$ ,  $Psk = -0,89$ ,  $Pku = 3,955$ ,  $Psm = 0,036 \text{ mm}$ ,  $Pdq = 10,218^\circ$ ,  
 $Pk = 2,799 \mu\text{m}$ ,  $Ppk = 0,414 \mu\text{m}$ ,  $Pvk = 1,804 \mu\text{m}$



$Pq = 0,59 \mu\text{m}$ ,  $Psk = -3,074$ ,  $Pku = 14,439$ ,  $Psm = 0,035 \text{ mm}$ ,  $Pdq = 9,229^\circ$ ,  
 $Pk = 0,509 \mu\text{m}$ ,  $Ppk = 0,154 \mu\text{m}$ ,  $Pvk = 1,705 \mu\text{m}$

**Rys. 3.** Profil mierzony (a), jego funkcja autokorelacji (b), profil modelowany przy pomocy metody PJ (c), jego funkcja autokorelacji (d), profil modelowany przy pomocy PR (e), jego funkcja autokorelacji (f)

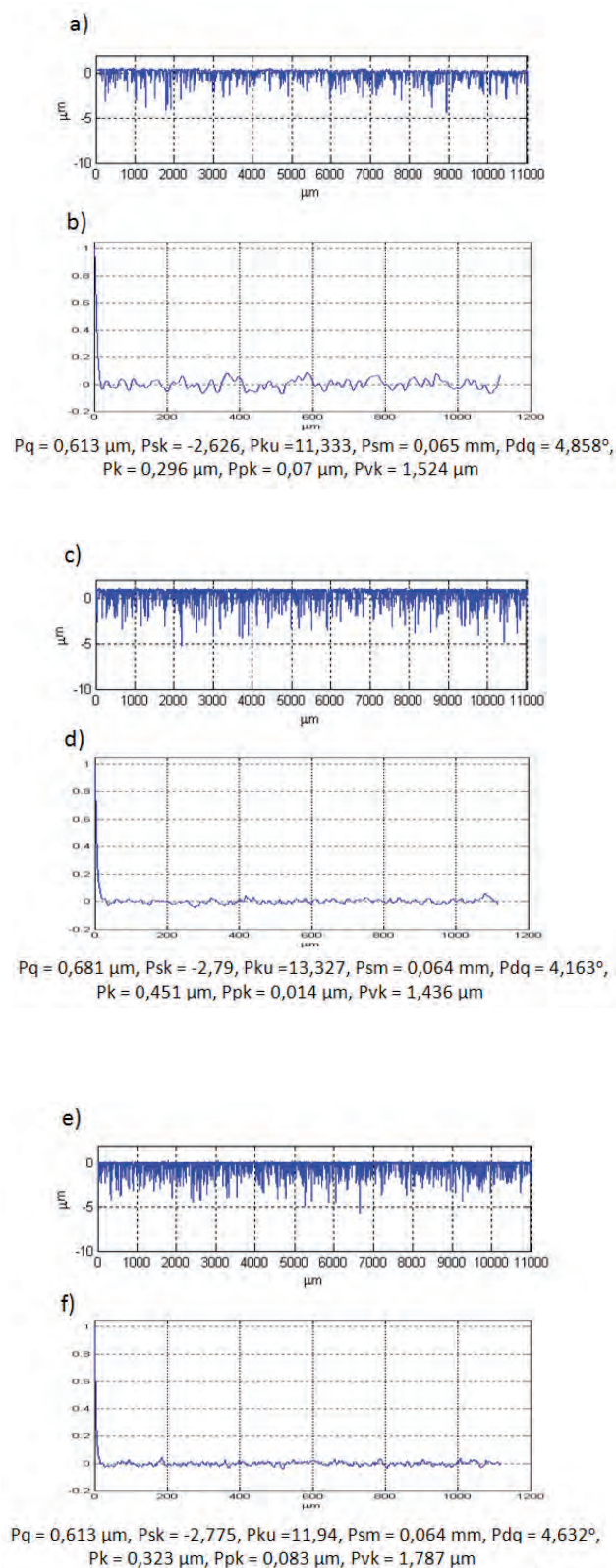
**Fig. 3.** Measured profile (a), its autocorrelation function (b), profile modeled by PJ method (c), its autocorrelation function (d), profile modeled by PR method (e), its autocorrelation function (f)



$Pq = 1,095 \mu\text{m}$ ,  $Psk = -1,349$ ,  $Pku = 4,692$ ,  $Psm = 0,04 \text{ mm}$ ,  $Pdq = 9,597^\circ$ ,  
 $Pk = 1,407 \mu\text{m}$ ,  $Ppk = 0,28 \mu\text{m}$ ,  $Pvk = 2,208 \mu\text{m}$

**Rys. 4.** Profil mierzony (a), jego funkcja autokorelacji (b), profil modelowany przy pomocy metody PJ (c), jego funkcja autokorelacji (d), profil modelowany przy pomocy PR (e), jego funkcja autokorelacji (f)

**Fig. 4.** Measured profile (a), its autocorrelation function (b), profile modeled by PJ method (c), its autocorrelation function (d), profile modeled by PR method (e), its autocorrelation function (f)



**Rys. 5.** Profil mierzony (a), jego funkcja autokorelacji (b), profil modelowany przy pomocy metody PJ (c), jego funkcja autokorelacji (d), profil modelowany przy pomocy PR (e), jego funkcja autokorelacji (f)

**Fig. 5.** Measured profile (a), its autocorrelation function (b), profile modeled by PJ method (c), its autocorrelation function (d), profile modeled by PR method (e), its autocorrelation function (f)

**Tab. 2.** Parametry modelowane metodą PJ  
**Tab. 2.** Parameters modeled by PJ method

Metoda modelowania	PJ	
	błąd względny, %	błąd bezwzględny
Pa	6,49	0,04 $\mu\text{m}$
Pq	5,29	0,05 $\mu\text{m}$
Psk	6,17	0,11
Pku	10,06	1,08
PSm	10,87	0,014 mm
Pdq	14,11	1,25°
Pk	17,6	0,14 $\mu\text{m}$
Pvk	10,3	0,21 $\mu\text{m}$
Ppk	22,2	0,05 $\mu\text{m}$

Wartości parametrów Pa i Pq profilu modelowanych były bardziej zgodne z parametrami profilu mierzonych po zastosowaniu metody PJ. Takich wyników należało się spodziewać, ponieważ w modelu PJ założono wartość parametru Pq, zaś wartość parametru Pa jest skorelowana z nim. Należało się również spodziewać mniejszych rozbieżności parametrów Psk i Pku profilu modelowanych metodą PJ, ponieważ w modelu przyjęto wartości oczekiwane tych parametrów. Zostało to również potwierdzone. Możliwe, że zastosowanie mniejszych wartości tolerancji  $\delta Psk$  przyczyniłoby się do zmniejszenia błędów względnych modelowania tego parametru. Ponieważ parametrami wejściowymi metody PR były wyróżniki ujęte w normie ISO 13565-3, stosowanie tej metody powinno zapewniać dokładne wartości tych parametrów. To przypuszczenie zostało potwierdzone. Wartości średnie różnic względnych były mniejsze niż 5%. Natomiast błędy określenia tych parametrów po zastosowaniu metody PJ znaczne. Jest to zrozumiałe, ponieważ metoda ta nie opera się na nakładaniu profili.

Natomiast stosowanie metody PR zapewniło bardziej poprawne wartości parametru wzdłużnego PSm w porównaniu z metodą PJ. Również wartości długości korelacji były bardziej zbliżone do założonych po zastosowaniu metody PR. Natomiast stosowanie obu metod spowodowało podobne różnice pochylenia średniokwadratowego Pdq.

W Europie do oceny powierzchni cylindrów stosuje się powszechnie parametry zawarte w normie ISO 13565-2. Dlatego parametry te włączono do analizy. Stwierdzono niewielkie rozbieżności parametru Pvk oraz znaczne Pk. Jest to niekorzystne – stwierdzono, że zużycie oleju oraz emisja składników toksycznych przez silnik jest skorelowana z wartością parametru Pk tulei cylindrowych [1]. Natomiast stosowanie metody modelowania PJ powoduje zbyt duże błędy określenia parametru Ppk. Parametr ten nie ma jednak istotnego

znaczenia tribologicznego. Wydaje się, że stosowanie metody PR zapewnia poprawniejsze dopasowanie wierzchołkowej części nierówności profili modelowanych do profili mierzonych, niż metoda PJ.

Nie zaobserwowano tendencji do powstawania różnic między parametrami powierzchni mierzonych i modelowanych w przypadku większości analizowanych parametrów. Zauważono jedynie, że stosowanie metody PR zapewnia większe wartości parametru  $P_k$ , zaś mniejsze  $P_{vk}$  w porównaniu z wykorzystaniem metody PJ.

Kolejne rys. 3, 4 i 5 przedstawiają przykłady profili mierzonych wraz z ich funkcjami autokorelacji oraz profili symulowanych (i ich funkcji autokorelacji) z wykorzystaniem analizowanych metod. Podano również wartości parametrów profili nierówności.

## 5. Wnioski

Zastosowanie oryginalnego algorytmu nakładania profili, opartego na prognozowaniu parametrów  $P_{pq}$ ,  $P_{vq}$  i  $P_{mq}$  oraz zapewnieniu znajdowania się długości korelacji i współczynnika skośności profilu modelowego w granicach tolerancji, zapewnia automatyczne generowanie komputerowe profili dwuprocesowych. Metoda ta powoduje jednak większe błędy określenia parametrów  $P_a$ ,  $P_q$ ,  $P_{sk}$ ,  $P_{ku}$ ,  $P_{dq}$ ,  $P_k$  i  $P_{ku}$ , niż zastosowana modyfikacja algorytmu Johnsona. Natomiast wartości parametrów  $P_{Sm}$  i  $P_k$  są lepiej dopasowane do parametrów profilu mierzonych po zastosowaniu algorytmu opartego na nakładaniu profili. W dalszych badaniach należy dążyć do zmniejszenia błędów parametrów  $P_k$  i  $P_{pk}$  przy użyciu obu metod oraz do zmniejszenia wartości tolerancji określenia wartości współczynnika skośności  $P_{sk}$ . Metoda nakładania profili ma większe znaczenie praktyczne, pozwala bowiem na modelowanie powstawania profili tulei cylindrowych w procesie gładzenia płaskowierzchołkowego lub zużycia.

Praca zrealizowana w ramach projektu badawczego Nr N N505 487540.

## Bibliografia

- Johansson S., Nilsson P.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosen B.-G., *New cylinder liner surfaces for low oil consumption*. Tribology International 41, 2008, 854–85.
- Schmid J., *Optimized honing process for cast iron running surfaces*. VDI Symposium "Piston running surfaces, pistons and conrods". Boblingen, Germany, 2006.
- Nemoto K., Yanagi K., Aketagawa M., Kanda D., Yoshida I., Uchidate M.: *A study on surface material measures for areal surface texture measuring instruments – measuring conditions for the areal profiling*. Proceedings of ISTMI 2007 Congress, Sendai, Japan, 2007, 801–804.
- Uchidate M., Shimizu T., Iwabuchi A., Yanagi K.: *Generation of reference data of 3-d texture using the non-casual 2-D AR model*. 9<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Halmstad University, Szwecja, 2003.
- Hu Y.Z., Tonder K.: *Simulation of 3-D random surface by 2-D digital filter and Fourier analysis*. Int. J. Mach. Tools Manufact. 32, 1992, 82–90.
- Newland D.E.: *An introduction to random vibration and spectral analysis*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Longman 1984
- Wu J.-J.: *Simulation of rough surfaces with FFT*. Tribology International 33, 2000, 47–58.
- Hill I.D., Hill R., Holder R.L.: *Fitting Johnson curves by moments*. Applied Statistics 25/2, 1976, 180–189.
- Watson W., Spedding T.A.: *The time series modelling of non-Gaussian engineering processes*. Wear 83, 1992, 215–231.
- Wu J.-J.: *Simulation of non-Gaussian surfaces with FFT*. Tribology International 27, 2004, 339–346.
- Malburg M.C., Raja J.: *Characterization of surface texture generated by plateau-honing process*. CIRP Annals, 42/1, 1993, 637–640.
- Whitehouse D.J.: *Assessment of surface finish profiles produced by multi-process manufacture*. Proceeding of the Inst. Mech. Engrs 199/4, 1985, 263–270. ■

### prof. dr hab. inż. Paweł Pawlus

Pracuje w Katedrze Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji Politechniki Rzeszowskiej. Główny obszar badań naukowych: metrologia techniczna, tribologia. Jest autorem oraz współautorem około 200 artykułów, głównie z zakresu analiz oraz oddziaływań tribologicznych topografii powierzchni.

e-mail: ppawlus@prz.edu.pl



### dr Rafał Reizer

Urodzony 24 października 1975 r. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2009 r. na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Zakładzie Mechaniki, Konstrukcji i Technologii Maszyn w Instytucie Techniki na Uniwersytecie Rzeszowskim. Obszar zainteresowań to modelowanie SGP, metrologia warstwy wierzchniej.

e-mail: rreizer@univ.rzeszow.pl

