

Szum pomiarowy jako składowa niepewności pomiarów struktury geometrycznej powierzchni

Measuring noise as a component of uncertainty measurements of the surface texture

TOMASZ DOBROWOLSKI
JAN TOMASIK
KATARZYNA TANDECKA
MAREK MAGDZIAK
RAFAŁ REIZER*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.202>

Jednym ze źródeł błędów, mających wpływ na niepewność pomiarów struktury geometrycznej powierzchni, jest szum pomiarowy (zwany szumem dynamicznym), będący kombinacją szumu wewnętrznego przyrządu pomiarowego oraz oddziaływania środowiska zewnętrznego. W artykule porównano szum pomiarowy dla przyrządów bazujących na różnych metodach pomiaru struktury geometrycznej powierzchni, wykorzystywanych podczas realizacji projektu nr PBS2/A6/20/2013 „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiarów topografii powierzchni w skali mikro i nano”, objętego Programem Badań Stosowanych i finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

SŁOWA KLUCZOWE: szum pomiarowy, pomiary optyczne, pomiary stykowe, struktura geometryczna powierzchni

One of the sources of errors affecting the uncertainty of measurements of the surface texture is the measurement noise, called dynamic noise, which is a combination of the internal noise of the measuring instrument and the influence of the external environment. The article presents the comparison of measurement noise for instruments using various methods of measuring the surface texture that were used during the implementation of the project No. PBS2/A6/20/2013/NCBiR/24/10/2013 “Research and evaluation of reliability of modern methods of surface topography measurements in micro and nano scale”.

KEYWORDS: measuring noise, optical measurements, contact measurements, surface texture

W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój nowych metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni, umożliwiających ocenę stereometrii powierzchni zarówno w skali mikro, jak i nano. Na temat metod pomiarów i ich oceny powstało wiele publikacji [1–4]. Najczęściej stosowanymi metodami pomiarów stereometrii powierzchni są: profilometria stykowa ostrzem odwzorowującym, profilometria z zastosowaniem głowic konfokalnych, interferometria skaningowa koherentna, mikroskopia konfokalna i mikroskopia sił atomowych.

Na uzyskane wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni wpływa – niezależnie od zastosowanej metody pomiaru – wiele czynników, które są składnikami niepewności pomiaru. Jednym z nich jest szum pomiarowy, stanowiący składową sygnału wyjściowego. Źródła jego powstawania można podzielić na te wynikające z zasady działania samego przyrządu oraz z oddziaływania środowiska zewnętrznego na proces pomiarowy. Do najważniejszych czynników generujących szum po-

miarowy zalicza się: niestabilność układów elektronicznych, drgania powstałe w wyniku działania napędów mechanicznych, drgania zewnętrzne w miejscu zainstalowania przyrządu, ruch powietrza wywołany wentylacją lub klimatyzacją oraz zaburzenia elektromagnetyczne. Wartość i charakter szumu pomiarowego zależą od konstrukcji przyrządu i zastosowanej metody pomiarowej.

Jedną z metod oceny szumu pomiarowego przyrządów do pomiarów struktury geometrycznej powierzchni jest wykonanie pomiaru wzorca typu AFL (płaskiej płytki interferencyjnej) [5, 6]. Parametrami, które charakteryzują wartość szumu pomiarowego, może być średnia kwadratowa rzędnych profilu pierwotnego Pq lub profilu chropowatości Rq :

$$Pq, Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2}$$

gdzie: n – liczba rzędnych w profilu chropowatości, z – wartość rzędnej profilu chropowatości.

Pomiary powierzchni o małej chropowatości są szczególnie wrażliwe na czynniki zakłócające. W budżecie niepewności tego rodzaju pomiarów istotne jest zatem uwzględnienie wartości szumu.

Wyniki pomiarów

Badania szumu pomiarowego zostały wykonane w kilku ośrodkach badawczych w Polsce. Przeprowadzono je na czternastu przyrządach do oceny struktury geometrycznej powierzchni, reprezentujących dwie pierwsze klasy metod, zgodnie z systemem klasyfikacji przedstawionym w PN-EN ISO 25178-6:2011 [7], ponieważ dają one dane wyjściowe w postaci profilu liniowego $z(x)$ lub w postaci topografii przestrzennej $z(x, y)$. Na potrzeby badań przyrządy podzielono na dwie grupy: reprezentujące metody optyczne (symbol O) i metody stykowe (symbol S). Zestawienie przyrządów oraz przyjęte oznaczenia zawarto w tabl. I.

TABLICA I. Zestawienie przyrządów wykorzystanych w badaniach

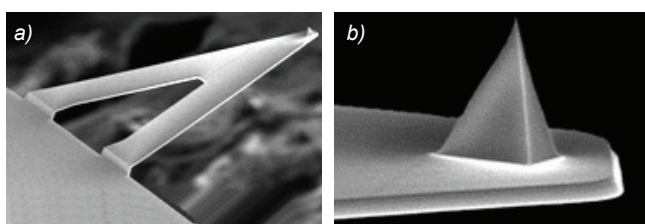
Lp.	Przyrząd	Metoda pomiaru
1.	O1	Profilometryczna – głowica konfokalna, zakres 130 μm
2.	O2	Profilometryczna – głowica konfokalna, zakres 130 μm
3.	O3	Profilometryczna – głowica konfokalna, zakres 400 μm
4.	O4	Koherentna interferometria korelacyjna
5.	O5	Profilometryczna – głowica konfokalna
6.	O6	Laserowy mikroskop konfokalny
7.	S1	Profilometria stykowa – głowica indukcyjna
8.	S2	Profilometria stykowa – głowica interferometryczna
9.	S3	Profilometria stykowa – głowica interferometryczna
10.	S4	Profilometria stykowa – głowica indukcyjna
11.	S5	Profilometria stykowa – głowica optomechaniczna
12.	S6	Profilometria stykowa – głowica indukcyjna
13.	S7	Profilometria stykowa – głowica indukcyjna
14.	S8	Profilometria stykowa – głowica indukcyjna

* Mgr inż. Tomasz Dobrowolski (t.dobrowolski@tu.kielce.pl) – Politechnika Świętokrzyska; dr inż. Jan Tomasik (j.tomasik@mchtr.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska; dr inż. Katarzyna Tandecka (katarzyna.tandecka@tu.koszalin.pl) – Politechnika Koszalińska; dr inż. Marek Magdziak (marmag@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska; dr Rafał Reizer (rreizer@ur.edu.pl) – Uniwersytet Rzeszowski

Podczas pomiarów struktury geometrycznej powierzchni za pomocą przyrządów profilometrycznych z wykorzystaniem wzorca AFL zaobserwowano również – ze względu na długi czas tych pomiarów – wyraźny wpływ cyklicznych zmian temperatury otoczenia na uzyskiwane wyniki, co objawiało się występowaniem falistości w kierunku osi prostopadłej do osi pomiaru [8]. Ten efekt można osłabić przez zastosowanie osłon termicznych [9].

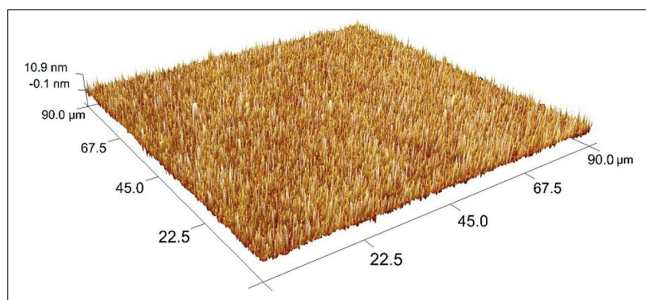
Pomiar wzorca typu AFL na mikroskopie sił atomowych

W celu sprawdzenia struktury geometrycznej wzorca typu AFL przeprowadzono jego pomiar za pomocą mikroskopu sił atomowych z wykorzystaniem mikrosondy (cantilevera) typu SCANASYST-AIR (rys. 1). Podstawowe wymiary ostrza mikrosondy według danych producenta są następujące: wysokość ostrza $2,5 \pm 8 \mu\text{m}$, kąt przedni $15 \pm 2,5^\circ$, kąt tylny $25 \pm 2,5^\circ$, promień nominalny 2 nm.



Rys. 1. Mikrosonda SCANASYST-AIR: a) dźwigienka, b) ostrze mikrosondy (www.brukerafmprombes.com)

Pomiar wzorca przeprowadzono na obszarze $90 \mu\text{m} \times 90 \mu\text{m}$, z odstępem próbkowania $\Delta X = \Delta Y = 0,175 \mu\text{m}$. Otrzymany obraz izometryczny wzorca przedstawiono na rys. 2, a w tabl. II zestawiono podstawowe parametry stereometrii powierzchni wzorca AFL.



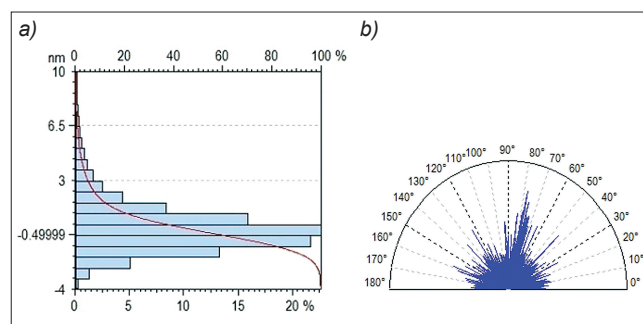
Rys. 2. Obraz izometryczny wzorca typu AFL

TABLICA II. Parametry stereometrii powierzchni wzorca AFL

Parametr	Opis	Wartość
Sq , nm	Średnie kwadratowe odchylenie powierzchni	1,61
Ssk	Asymetria powierzchni	1,60
Sku	Kurtoza powierzchni	7,73
Sp , nm	Maksymalna wysokość piku powierzchni	9,98
Sv , nm	Maksymalna głębokość doliny powierzchni	3,79
Sz , nm	Maksymalna wysokość powierzchni	13,77
Sa , nm	Średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni	1,15

Na rys. 3 przedstawiono rozkład rzędnych, krzywą Abbotta-Firestone'a oraz kierunkowość struktury powierzchni wzorca. Ze zmierzonej powierzchni wyodrębniono 512 profili, dla których obliczono średnie wartości podstawowych parametrów profilu pierwotnego i profilu chropowatości po zastosowaniu filtra Gaussa $\lambda_c = 0,025 \text{ mm}$ (tabl. III). Przykładowy profil pierwotny przedstawiono na rys. 4, a jego widmo częstotliwości – na rys. 5. Na podsta-

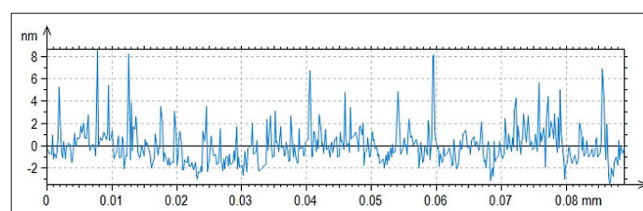
wie analizy wyników można stwierdzić, że struktura geometryczna wzorca AFL ma charakter losowy, izotropowy, o nierównościach o amplitudzie kilku nanometrów.



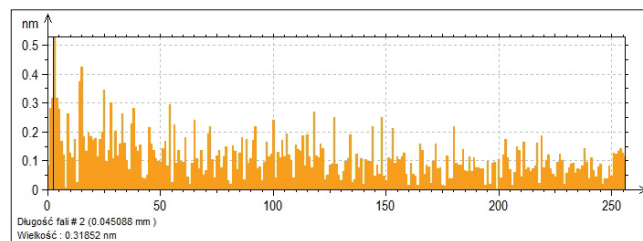
Rys. 3. Wzorec AFL: a) rozkład rzędnych powierzchni i krzywa Abbotta-Firestone'a, b) kierunkowość struktury

TABLICA III. Średnie parametry profilu wzorca AFL

Parametr	Opis	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Pq , nm	Średnie kwadratowe odchylenie profilu pierwotnego	1,6	0,12
PSm , μm	Średnia szerokość rowków profilu pierwotnego	1,4	0,1
Rq , nm	Średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości	1,3	0,11
RSm , μm	Średnia szerokość rowków profilu chropowatości	1,6	0,1



Rys. 4. Wyodrębniony przykładowy profil pierwotny

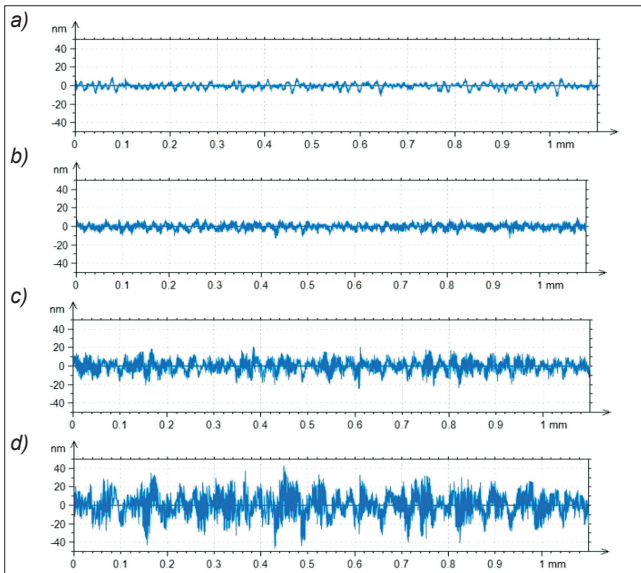


Rys. 5. Widmo częstotliwościowe wyodrębnionego profilu pierwotnego

Badanie wpływu prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego na wartość szumu pomiarowego

Ważnym parametrem, który należy wybrać przed pomiarem za pomocą profilometru stykowego, jest prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego. W celu ustalenia wpływu prędkości przesuwu końcówki pomiarowej na wartość szumu pomiarowego wykonano pomiary wzorca typu AFL. Wykorzystano do tego profilometr stykowy z głowicą interferometryczną, wyposażoną w końcówkę pomiarową w postaci igły diamentowej o promieniu $2 \mu\text{m}$ i kącie stożka 90° . Odstęp próbkowania wynosił $\Delta X = 0,125 \mu\text{m}$. Pomiary wykonano dla następujących prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego v : 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2 mm/s.

Na rys. 6 przedstawiono uzyskane profile chropowatości dla wybranych prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego. W tabl. IV zamieszczono natomiast wartości parametrów Pq i Rq (po zastosowaniu filtra Gaussa $\lambda_c = 0,08 \text{ mm}$) w zależności od prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego.



Rys. 6. Profile chropowości uzyskane dla prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego: a) $v = 0,1$ mm/s, b) $v = 0,5$ mm/s, c) $v = 1,0$ mm/s, d) $v = 2,0$ mm/s

TABLICA IV. Wartości parametrów profilu pierwotnego i profilu chropowości dla wzorca AFL w zależności od prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego

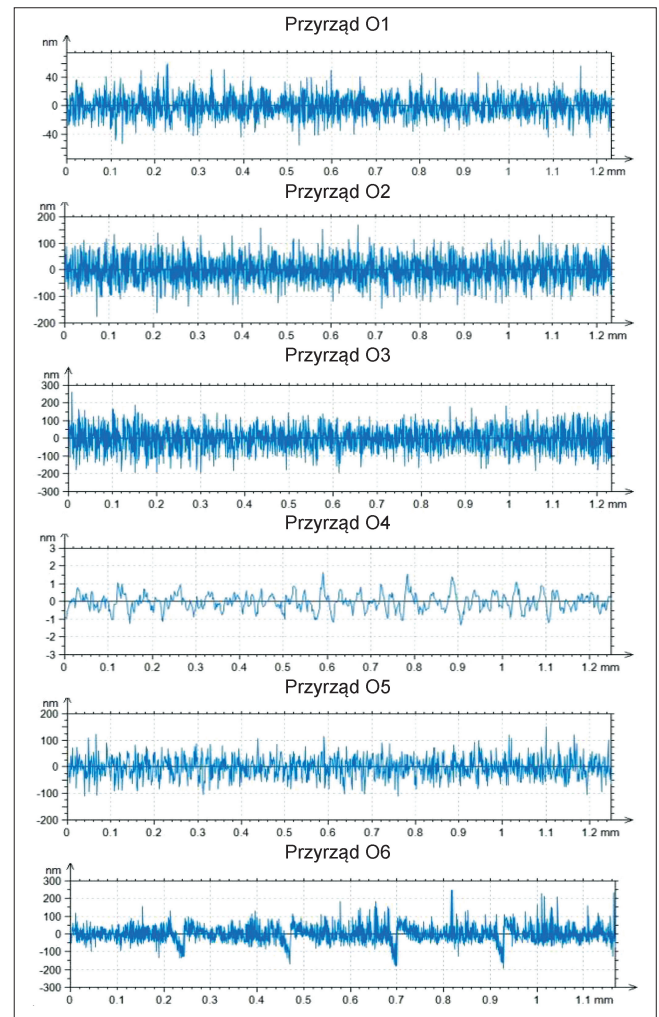
v , mm/s	0,1	0,25	0,5	1,0	2,0
Pq , nm	3,6	3,6	3,7	7,0	14,1
Rq , nm	2,9	2,6	2,9	6,4	12,8

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że do prędkości $v = 0,5$ mm/s wartość szumu pomiarowego utrzymuje się na stałym poziomie, natomiast dla prędkości $v = 2$ mm/s jest niemal czterokrotnie większa.

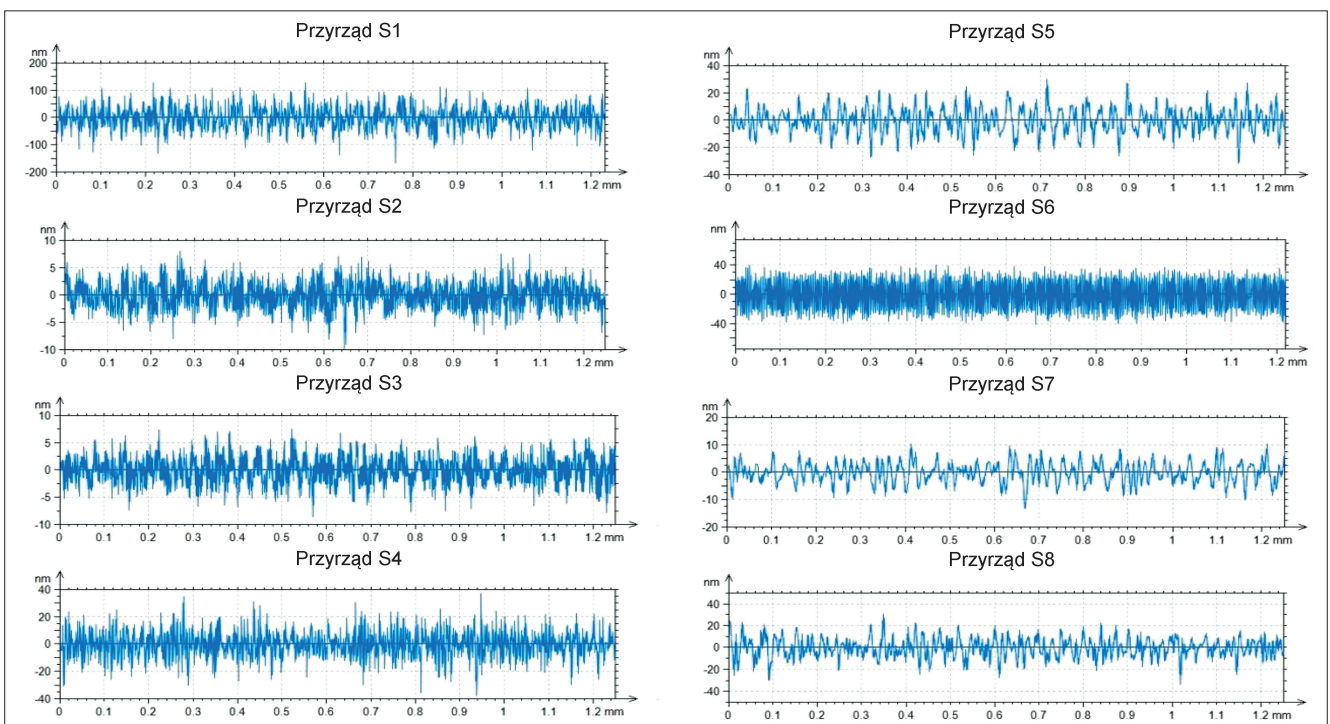
Badania porównawcze szumu pomiarowego

Pomiary porównawcze szumu pomiarowego przeprowadzono dla sześciu przyrządów optycznych i ośmiu przyrządów stykowych. Analizowano odcinek pomiarowy o długości 1,25 mm. Profile chropowości po zastosowa-

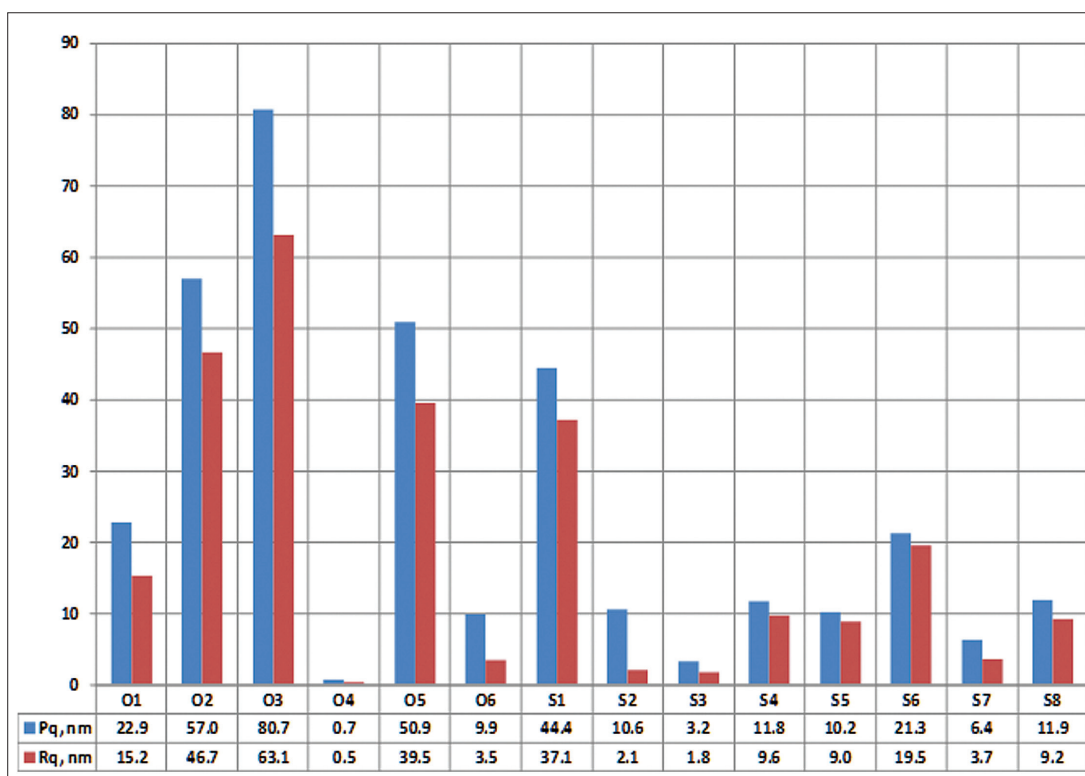
niu filtra Gaussa $\lambda_c = 0,08$ mm, uzyskane odpowiednio dla przyrządów optycznych i stykowych, przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Profile chropowości wzorca AFL, uzyskane w przypadku zastosowania przyrządów optycznych



Rys. 8. Profile chropowości wzorca AFL, uzyskane w przypadku zastosowania przyrządów stykowych



Rys. 9. Zestawienie szumu pomiarowego (parametrów Pq i Rq) dla przyrządów optycznych i stykowych

Na rys. 9 zaprezentowano wartości parametrów Pq i Rq , otrzymane w przypadku zastosowania przyrządów optycznych i stykowych.

Przyrządy optyczne O1, O2, O3 i O5 oraz przyrząd stykowy S1 to przyrządy profilometryczne, w których przesuw jest realizowany przez stolik XY. W ich przypadku uzyskano największe wartości szumu pomiarowego. Rozkład rzędnych zmierzonego profilu na wzorcu AFL zazwyczaj jest zbliżony do rozkładu normalnego. Wyjątek stanowi profil o charakterze rozkładu równomiernego, uzyskany za pomocą przyrządu stykowego S6.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że spośród wszystkich przyrządów najmniejszą wartością szumu pomiarowego charakteryzuje się przyrząd optyczny O4, wykorzystujący metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej. Zmierzone wartości parametrów Pq i Rq są nawet mniejsze niż w przypadku użycia mikroskopu sił atomowych. Może to wynikać z faktu, że odstęp próbkowania dla tego przyrządu wynosił $\Delta X = 1,66 \mu\text{m}$, czyli był ponad dziesięciokrotnie większy niż dla mikroskopu sił atomowych.

Spośród przyrządów stykowych najmniejszymi wartościami szumu pomiarowego charakteryzują się przyrządy S2 i S3, wyposażone w głowice interferometryczne.

Największymi wartościami szumu pomiarowego charakteryzują się przyrządy optyczne O1, O2, O3 i O5, wyposażone w głowice konfokalne, oraz przyrząd stykowy S1 z głowicą indukcyjną. Wysoka wartość szumu dla tych przyrządów jest spowodowana tym, że przesuw w osiach poziomych jest realizowany przez stolik pomiarowy XY.

Dla przyrządu O6, tj. laserowego mikroskopu konfokalnego, na profilu chropowatości można zaobserwować okresowe zakłócenia, wynikające z błędów łączenia pojedynczych pomiarów w przypadku konieczności wykorzystania funkcji stitching, odpowiedniej dla przyrządów optycznych.

Przeprowadzone badania potwierdziły, że dla wielu przyrządów szum pomiarowy jest znaczącą składową budżetu niepewności pomiarów struktury geometrycznej powierzchni. Z tego powodu celowe jest sprawdzanie szumu w celu zapewnienia wiarygodności pomiarów.

Artykuł powstał na podstawie wyników uzyskanych podczas realizacji projektu nr PBS2/A6/20/2013 „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano”, finansowanego ze środków NCBR.

Artykuł został sfinansowany w ramach projektu realizowanego przez Fabrykę Łożysk Toczyńskich – Kraśnik S.A., finansowanego ze środków programu operacyjnego Unii Europejskiej „Inteligentny Rozwój”.

LITERATURA

- Wiśniewska M., Tomasiak J., Żebrowska-Łucyk S. „Metody cyfrowej filtracji wyników pomiarów SGP według norm z serii ISO 16610”. *Mechanik*. 87, 12 (2014): s. 1024–1027.
- Kacalak W., Tandecka K., Mathia T.G. “A method and new parameters for assessing the active surface topography of diamond abrasive films”. *Journal of Machine Engineering*. 16, 4 (2016): s. 95–108.
- Wdowik R., Magdziak M., Porzycki J. “Measurements of surface roughness in ultrasonic assisted grinding of ceramic materials”. *Applied Mechanics and Materials*. 627 (2014): s. 191–196.
- Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. “The analysis of directionality of honed cylinder liners surfaces”. *Scanning*. 36, 1 (2014): s. 95–104.
- PN-EN ISO 25178-70:2014 SGP przestrzenna – Część 70: Wzorce materialne.
- Giusca Claudiu L., Leach Richard K. “Good Practice Guide No. 129. Calibration of the metrological characteristics of areal contact stylus instruments”.
- PN-EN ISO 25178-6:2011 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 6: Klasyfikacja metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni.
- Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B. “Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry”. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. 65, 1 (2017): s. 53–61.
- Adamczak S., Świdorski J., Dobrowolski T. “Wpływ zastosowania osłony termicznej profilometru stykowego na wyniki pomiarów stereometrii powierzchni”. *Mechanik*. 2 (2018): s. 126–128. ■