

Robert TOMKOWSKI¹, Wojciech KAPŁONEK², Wojciech KACALAK¹, Czesław ŁUKIANOWICZ², Dariusz LIPIŃSKI¹, Robert CINCIO¹

¹POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA MECHANIKI PRECYZYJNEJ, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

²POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, ZAKŁAD METROLOGII I JAKOŚCI, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

Metody filtracji cyfrowej w ocenie topografii powierzchni

Mgr inż. Robert TOMKOWSKI

Pracownik w Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się metrologią powierzchni, modelowaniem i symulacją procesów obróbki oraz zastosowaniami metod sztucznej inteligencji. Obecnie, autor przygotowuje rozprawę doktorską pt. "Analiza cech stereometrycznych powierzchni po obróbce ścierną z zastosowaniem nowych parametrów oceny".



e-mail: robert.tomkowski@tu.koszalin.pl

Dr inż. Wojciech KAPŁONEK

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2003 r.). W 2010 r. obronił z wyróżnieniem rozprawę doktorską. Od 2007 r. jest pracownikiem Zakładu Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej, gdzie obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół zagadnień związanych z pomiarami struktury geometrycznej powierzchni metodami optycznymi oraz wykorzystaniem technik przetwarzania i analizy obrazu.



e-mail: wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl

Prof. dr hab. inż. Wojciech KACALAK

Kierownik Katedry Mechaniki Precyzyjnej. Specjalność naukowa: mechatronika, diagnostyka, optymalizacja i automatyzacja procesów mikroobróbki oraz procesów bardzo dokładnej obróbki ścierną, w tym zwłaszcza materiałów trudno obrabialnych, a także budowa i eksploatacja precyzyjnych urządzeń technologicznych.



e-mail: wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl

Prof. dr hab. inż. Czesław ŁUKIANOWICZ

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2001 r. kieruje Zakładem Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji. Specjalizuje się w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni metodami stykowymi i optycznymi. Opublikował z tego zakresu ponad 100 artykułów i referatów naukowych.



e-mail: czeslaw.lukianowicz@tu.koszalin.pl

Dr inż. Dariusz LIPIŃSKI

W latach 1999 – 2005 asystent a od roku 2005 adiunkt w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się zastosowaniem metod sztucznej inteligencji do optymalizacji i oceny jakości procesów obróbki.



e-mail: dariusz.lipinski@tu.koszalin.pl

Mgr inż. Robert CINCIO

Autor jest pracownikiem Katedry Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Specjalizuje się w modelowaniu i ocenie powierzchni kształtowanych w różnych procesach technologicznych, analizie obrazu oraz zastosowaniach sztucznej inteligencji. Obecnie, autor przygotowuje rozprawę doktorską pt.: "Modelowanie i system oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce ścierną".



e-mail: robert.cincio@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Jedną z procedur odgrywających ważną rolę we współczesnej metrologii powierzchni jest filtracja cyfrowa. Jest ona realizowana za pomocą filtrów, stanowiących złożone narzędzia matematyczne przeznaczone do analiz charakterystyk szerokiej gamy powierzchni. W praktyce filtry stosowane są m.in. do tłumienia szumu, korekcji danych uzyskanych z aparatury pomiarowej oraz eksponowania ważnych, z punktu widzenia prowadzonych analiz, cech powierzchni. Dowodem na to, są ciągłe prace komitetu normalizacyjnego ISO, który opracowuje normy z grupy ISO 16610, dotyczące filtrów cyfrowych. W pracy przedstawiono przykładowe analizy topografii powierzchni technicznych z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego TalyMap[®] oraz SPIPT[™]. Przedstawiono również metodykę oceny topografii powierzchni w układzie 3D.

Słowa kluczowe: filtrowanie, filtry cyfrowe, struktura geometryczna powierzchni, topografia powierzchni, parametry SGP.

Digital filtering methods in the assessment of surface topography

Abstract

One of the most important procedures in modern surface metrology is digital filtering. It is realized by many filters which are complicated mathematical tools for analysis of a wide variety of surface characteristics. In practice, filters are used among others for denoising, correcting the data obtained from measuring tools and displaying important characteristics of surfaces. The ISO committee is continuing works to develop the standards

of the ISO 16610 group, concerning the digital filters. This group contains description of various filters, namely: linear profile filters (basic concepts – ISO/DIS 16610-20, spline filters - ISO/DIS 16610-22, spline wavelets – ISO/DIS 16610-29), morphological profile filters (basic concepts – ISO/DIS 16610-40, disk and horizontal line-segment – ISO/DIS 16610-41, scale space techniques – ISO/DIS 16610-49), robust areal filters (Gaussian regression filters – ISO/DIS 16610-71) and areal morphological filters (segmentation – ISO/DIS 16610-85). The paper presents examples of technical surface topography analysis using the specialized computer software TalyMap and SPIP. There is also proposed a methodology of assessing the surface topography in 3D.

Keywords: filtering, digital filters, the structure of the surface geometry, surface topography, the parameters of the surface texture.

1. Wprowadzenie

Pomiary topografii powierzchni, domyślnie obejmują również filtrowanie. Nie jest bowiem możliwe mierzenie powierzchni bez filtracji. Każda zastosowana metoda pomiarowa dokonuje filtracji, chociażby w trakcie rejestracji danych pomiarowych poprzez digitalizację sygnału wejściowego. Filtry występujące w układach pomiarowych topografii powierzchni, to przede wszystkim filtry mechaniczne (np. ostrze odwzorowujące profilometru stykowego), filtry elektryczne (np. częstotliwość próbkowania, CCD) oraz filtry cyfrowe (np. morfologiczne, Gaussa, oparte na funkcjach sklepanych).

Filtracja jest procesem przetwarzania sygnału, w którym jest dokonywana kontrolowana zmiana jego widma [1]. Zmiana widma

sygnału, najczęściej polega na separacji składowych sygnału wejściowego. W przypadku analizy topograficznej, następuje separacja następujących elementów sygnału: kształtu, falistości i chropowatości.

Filtracja sygnału otrzymywanego z powierzchni, umożliwia identyfikację i wyróżnienie tych składników, które są istotne ze względu na wymagania funkcjonalne powierzchni lub dla oceny stopnia zgodności metrologicznej, w przypadku kontroli jakości. Metody filtracji profilu opisano szeroko w pracy [2], natomiast filtracji powierzchni w pracy [3]. Forma etapów postępowania podczas analizy profili okresowych i nieokresowych została przedstawiona w pracy [4]. Unormowanie czynności przetwarzania i analizy danych topograficznych, umożliwiłoby uzyskanie powtarzalności wyników analiz.

Filtracja cyfrowa jest stosunkowo nową dyscypliną cyfrowego przetwarzania sygnałów, a pierwsza norma dotycząca filtracji, w odniesieniu do struktury geometrycznej powierzchni (SGP), powstała pod koniec XX w. [5]. Norma ta dotyczy zastosowania pasmowego filtra z korekcją fazy (filtr Gaussa), po przyjęciu długości fali odcięcia filtra λ_{co} (cut-off). Zasady doboru granicznej długości fali filtra λ_{co} opisuje norma [6].

Dzięki rozwojowi w dziedzinie komputeryzacji, można obecnie w dość szybki sposób przeprowadzać analizę widmową, projektować filtry cyfrowe [7], rozwijać procedury filtracji w różnych dziedzinach, przesyłać i kompresować dane.

Takie szerokie spektrum zastosowań daje producentom oprogramowania, przeznaczonych do analiz SGP, możliwość implementacji różnych metod i algorytmów filtracji sygnałów. Niestety, stosowane w programach metody filtracji, niejednokrotnie prowadzą do sytuacji, w której dla tej samej powierzchni analizowanej przez ten sam zestaw filtrów, otrzymuje się niejednokrotnie różne wyniki. Przyczyną tego, może być brak poprawnego algorytmu postępowania w przeprowadzanej analizie topograficznej.

Od wielu lat Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) prowadzi prace nad utworzeniem norm dotyczących analizy topograficznej i filtracji powierzchni w układzie 3D. Jeden z komitetów normalizacyjnych ISO rozwija te prace, czego wynikiem są nowe normy z grupy 25178 oraz 16610 (obecnie w fazie projektu).

2. Cyfrowa filtracja powierzchni

W dotychczasowej analizie struktury geometrycznej powierzchni reprezentowanej przez jej profil, stosowanych może być szereg filtrów. Zostały one opisane w normie [6], natomiast procedurę filtrowania i ogólne warunki pomiaru opisano w normie [9].

Dla wszystkich pomiarów cyfrowych najczęściej stosowany jest filtr z korekcją fazy, który umożliwia uzyskanie informacji o mierzonej chropowatości. Filtry z korekcją fazy posiadają tzw. funkcję wagi, która jest niczym innym jak funkcją gęstości prawdopodobieństwa Gaussa [5] i dla pomiarów profilu wyznacza taką długość fali sinusoidalnej, dla której 50% amplitudy przenieszone jest przez profil chropowatości – graniczna długość fali filtra λ_{co} (cut-off).

Ostatnie prace przyczyniły się do rozwoju filtracji cyfrowej. Umożliwiło to opracowanie filtrów pasmowych, morfologicznych, opartych na funkcjach sklepanych [8], czy też filtrów odpornych na błędy (ang. *robust filters*), gdzie nie występują tzw. efekty końcowe i zniekształcenia chropowatości powierzchni o warstwowości właściwościach funkcjonalnych. Propozycje nowych norm obejmują opisy różnych metod filtracji zarówno profilu jak i powierzchni.

3. Wymagania dotyczące filtracji cyfrowej

Filtrowanie cyfrowe jest powszechne w pomiarach topografii powierzchni. Jednak kwestie związane z specyfikacją i stosowaniem filtrów powierzchniowych nie były szczegółowo rozpatrywane. Niektóre koncepcyjne zagadnienia dotyczące wymagań, jakie są stawiane filtrom powierzchniowym, opisane w pracy [10], przedstawiono poniżej:

1. Specyfikacja i implementacja filtrów dotyczących powierzchni jest przede wszystkim uzależniona od ich przeznaczenia.
2. Możliwe jest zdefiniowanie filtrów w dziedzinie przestrzennej, gdzie zazwyczaj takie filtrowanie służy do określenia funkcji dopasowania powierzchni.

4. Projekty nowych norm – ISO/DIS 16610

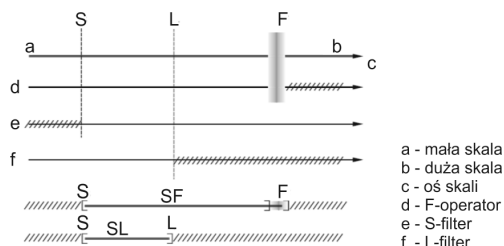
Komitet Techniczny ISO (TC 212), począwszy od nowo powstałej grupy norm ISO o numerze 25178 [11], dokonał redefinicji podstawy oceny SGP w układzie 3D. Przewiduje się, że przysze prace normalizacyjne rozszerzą opracowane koncepcje oceny SGP w układzie 3D na układ 2D, wymagając tym samym korekty wszystkich obecnych norm oceny SGP, m.in. ISO 4287, ISO 4288, ISO 11562, ISO 12085 oraz ISO 13565.

Oznaczenia parametrów 3D określone w normie [11] zaczynają się na literę S dla powierzchni lub V dla objętości. Nie odzwierciedlają one jednak warunków filtrowania, tak jak ma to miejsce w przypadku parametrów 2D i nie posiadają przedrostków P (*Primary*), R (*Roughness*) lub W (*Waviness*). Jeżeli wymagane są parametry chropowatości, bądź falistości w układzie 3D, powierzchnia musi być filtrowana z zastosowaniem znormalizowanych operatorów filtracji, przed wyznaczeniem właściwych parametrów. Domyślnie, parametry 3D są wyznaczane dla całej powierzchni. W przypadku profilu parametry 2D są średnimi wartościami wyznaczanymi dla określonych długości odcinków elementarnych i pomiarowych, natomiast parametry 3D uwzględniają wszystkie wartości ocenianej powierzchni.

Zestaw norm ISO o numerze 16610, obejmujący metody filtracji powierzchni, oraz zalecenia do stosowania poszczególnych filtrów, jest obecnie w fazie projektowej. Zbiór ten zwiera normy opisujące m.in. następujące filtry:

- a. oparte na funkcjach sklepanych (ang. *spline filters*) – ISO/DIS 16610-22,
- b. oparte na falkowych funkcjach sklepanych (ang. *spline wavelets*) – ISO/DIS 16610-29,
- c. morfologiczne profilu – ISO/DIS 16610-40 oraz ISO/DIS 16610-41,
- d. oparte na technikach skalowania przestrzennego (ang. *scale space techniques*) – ISO/DIS 16610-49,
- e. regresyjne Gaussa (ang. *gaussian regression filters*) – ISO/DIS 16610-71,
- f. morfologiczne powierzchniowe (ang. *areal morphological*) – ISO/DIS 16610-85.

Pomimo tego, że normy z tej grupy są w fazie projektu, to programy do analizy danych topograficznych już teraz umożliwiają korzystanie z nowych metod filtracji. Podstawowe pojęcia parametrów dotyczących filtracji, oraz ich nazwy i zakres działania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zależności pomiędzy S-filter, L-filter, F-operator oraz powierzchniami S-F i S-L [10]

Fig. 1. Relationships between the S-filter, L-filter, F-operator and S-F and S-L surfaces [10]

Poniżej zestawiono opisy, przedstawionych na rysunku 1 oznaczeń:

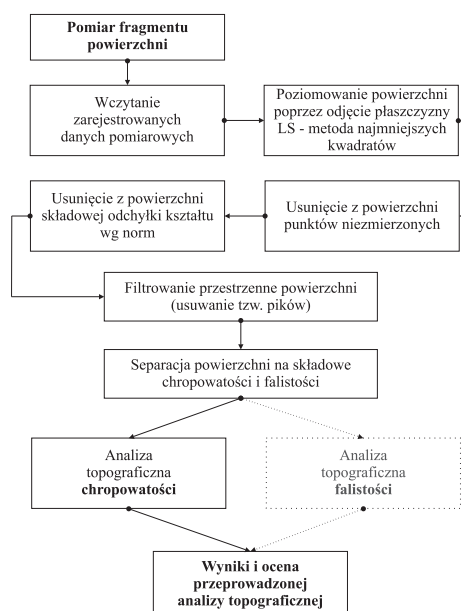
- S-FILTER: filtr eliminuje najmniejsze elementy z powierzchni pierwotnej (ang. *primary surface*),
- L-FILTER: filtr eliminuje największe elementy z powierzchni,
- F-OPERATOR: operator usuwający kształt,

- S-L SURFACE: powierzchnia otrzymana po filtrowaniu S i L.
- S-F SURFACE: powierzchnia otrzymana po filtracji S i zastosowaniu operatora F.

Należy zwrócić tutaj uwagę na to, że niektóre z operatorów F mogą mieć różne działanie filtracyjne. Pomimo tego, że ich działanie ogranicza występowanie elementów powierzchni dużej skali, to działanie to jest bardzo rozmyte. Stąd też rozmyta linia działania operatora F na rysunku 1.

5. Metodyka analizy topograficznej powierzchni

Z uwagi na sytuację, w której dla tej samej powierzchni analizowanej przez ten sam zestaw filtrów, otrzymuje się niejednokrotnie różne wyniki, autorzy proponują poniższą metodykę postępowania w zakresie analizy topograficznej (wg poniższego schematu).



Rys. 2. Schemat proponowanej metodyki przeprowadzania analizy topograficznej w układzie 3D

Fig. 2. Schematic diagram of the proposed methodology for topographic analysis in 3D

W badaniach analizowano powierzchnię czynną narzędzia ściernego. Dla zmierzonych fragmentów powierzchni, wyznaczono najczęściej stosowane parametry SGP w układzie 3D. Do tego celu wykorzystano dwa oprogramowania (do celów porównawczych) i następujący algorytm postępowania:

1. Wczytanie zarejestrowanego fragmentu powierzchni do oprogramowania (TalyMap, SPIP).
2. Poziomowanie powierzchni poprzez odjęcie płaszczyzny LS – metoda najmniejszych kwadratów (metoda szybka i dokładna dla małych kątów). Poziomowanie powierzchni odbywa się według wielomianu:

$$z_p(x, y) = z_0 + \sum_{i=1}^n a_i x^i + \sum_{i=1}^n b_i y^i, \quad (1)$$

gdzie: współczynniki a_i , b_i oraz c_i wielomianu są wyznaczane poprzez minimalizację sumy błędów kwadratowych (2):

$$E = \sum_x \sum_y (z_p(x, y) - z(x, y))^2. \quad (2)$$

Obraz powierzchni wynikowej $z'(x, y)$, jest obliczany poprzez odjęcie od powierzchni zmierzonej, wcześniej wyznaczonej funkcji dopasowania (1):

$$z'(x, y) = z(x, y) - z_p(x, y). \quad (3)$$

3. Skorygowanie na powierzchni punktów niezmiernych na podstawie wartości sąsiadujących punktów powierzchni (średnia). Podczas pomiarów optycznych SGP, mogą powstawać błędy pomiarowe. Główną przyczyną powstawania błędów w pomiarach optycznych to sama struktura powierzchni, a dokładniej nachylenia zboczy jej nierówności. Znaczne nachylenia zboczy nierówności uniemożliwiają zarejestrowanie światła odbitego od powierzchni mierzonej, co skutkuje brakiem sygnału pomiarowego (punkty niezmierny).
4. Usunięcie składowej odchyłki kształtu z zastosowaniem operatora F (wg nowych wytycznych ISO/TS 16610) (w przypadku powierzchni walcowych, usunięcie powierzchni nominalnej w kształcie cylindra),
5. Filtrowanie przestrzenne powierzchni, w celu usunięcia zniekształceń powierzchni (tzw. pików). Zastosowano filtrowanie Gaussa, o wymiarze okna 3×3 .
6. W celu analizy powierzchni chropowatości następuje usunięcie składowej odchyłki falistości zgodnie z normą [5], która opisuje separację długich i krótkich składowych profilu powierzchni. Jednowymiarowy, liniowy filtr Gaussa opisuje zależność:

$$S_{1D}(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_{co}} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_{co}}\right)^2}, \text{ gdzie } \alpha = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} = 0,4697, \quad (4)$$

w której: x – odległość od środka funkcji wagi; λ_{co} – graniczna długość fali filtru profilu, ($co = \text{cut-off}$).

Dwuwymiarowy filtr Gaussa jest multiplikacją w kierunku x i y jednowymiarowego filtru Gaussa (1D) i jest wyrażony wzorem:

$$S_{2D}(x, y) = S_{1D}(x) \times S_{1D}(y). \quad (5)$$

Jeżeli ocenie ma podlegać powierzchnia falistości, z powierzchni należy usunąć składową chropowatości.

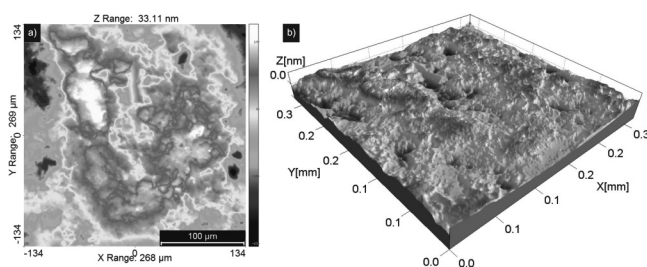
7. Wyniki i ocena SGP powierzchni wg opisanej metodyki.

6. Wybrane wyniki przeprowadzonych analiz

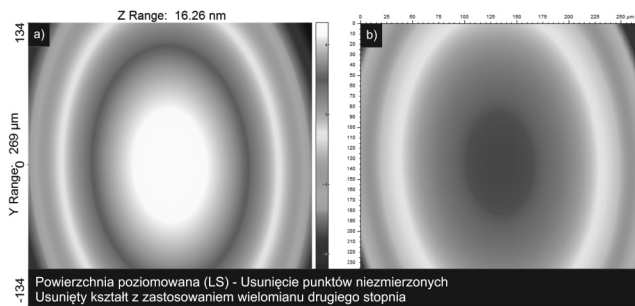
Do rejestracji danych topograficznych powierzchni zastosowano mikroskop konfokalny LEXT OLS4000 firmy Olympus, który znajduje się w Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej.

Do analizy zastosowano dwa wiodące oprogramowania do oceny SGP: Mountains™ o nazwie komercyjnej TalyMap™ (jako program dedykowany do profilometrów firmy TaylorHobson) firmy Digital Surf™ oraz SPIP™ (Scanning Probe Image Processor) duńskiej firmy Metrology A/S.

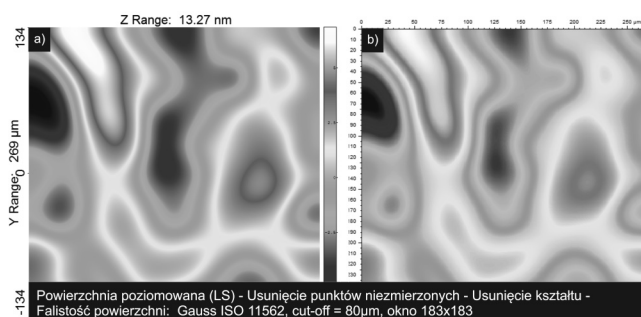
Poniżej, przedstawiono analizę SGP narzędzia ściernego (rys. 3.), jakim była ośelka ścierna, prostokątna, typu 9011-25x25x150 99A120H8VE01, firmy Andre Abrasive Articles Robert Andre.



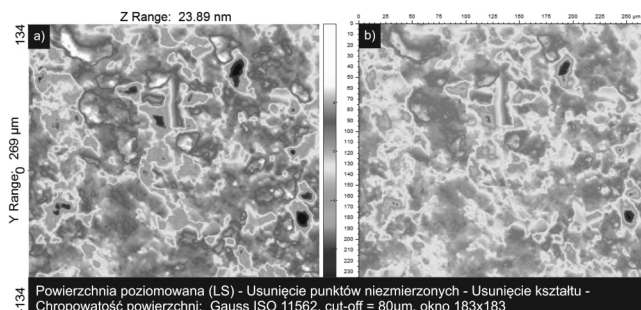
Rys. 3. Dane topograficzne ośelki ściernej: a) widok 2D, b) widok 3D
Fig. 3. Topographic data of whetstone: a) 2D view, b) 3D view



Rys. 4. Usunięty kształt z zastosowaniem wielomianu drugiego stopnia w programie: a) SPIP ($S_z = 16,25$ nm), b) TalyMap ($S_z = 16,50$ nm)
 Fig. 4. The form removed from a surface with using a polynomial of order 2 in the program: a) SPIP ($S_z = 16,25$ nm), b) TalyMap ($S_z = 16,50$ nm)



Rys. 5. Powierzchnia falistości po zastosowaniu filtra Gaussa z $\lambda_{co} = 80 \mu\text{m}$ wg normy [5] w programie: a) SPIP ($S_z = 13,25$ nm), b) TalyMap ($S_z = 13,30$ nm)
 Fig. 5. Surface waviness after applying the Gaussian filter $\lambda_{co} = 80 \mu\text{m}$ according to [5] in the program: a) SPIP ($S_z = 13,25$ nm), b) TalyMap ($S_z = 13,30$ nm)



Rys. 6. Powierzchnia chropowatości po zastosowaniu filtra Gaussa z $\lambda_{co} = 80 \mu\text{m}$ wg normy [5] w programie: a) SPIP ($S_z = 24,50$ nm), b) TalyMap ($S_z = 21,50$ nm)
 Fig. 6. Roughness surface after applying the Gaussian filter $\lambda_{co} = 80 \mu\text{m}$ according to [5] in the program: a) SPIP ($S_z = 24,50$ nm), b) TalyMap ($S_z = 21,50$ nm)

Tab. 1. Podstawowy zbiór parametrów SGP dla analizowanych danych w programie SPIP oraz TalyMap

Tab. 1. Basic set of roughness surface parameters, calculated in the SPIP and TalyMap

Parametr	SPIP	TalyMap	Jednostka miary
S_q	2,36	2,36	nm
S_{sk}	-0,85	-0,88	
S_{ku}	4,80	4,78	
S_p	10,49	7,62	nm
S_v	14,01	13,9	nm
S_z	24,50	21,5	nm
S_a	1,81	1,80	nm

Dla uzyskanej według zaproponowanej procedury powierzchni chropowatości, wyznaczono podstawowy zbiór parametrów amplitudowych do oceny SGP, który zestawiono w tabeli 1.

7. Podsumowanie i wnioski

W Polsce brak jest unormowanych procedur dotyczących analizy SGP, w tym dotyczących filtracji. Taki brak wymuszenia, co do stosowania określonych procedur, może powodować błędy w interpretacji wyników przeprowadzonych analiz. W celu uniknięcia takich sytuacji, wskazane jest korzystanie ze znormalizowanego zestawu filtrów oraz zachowania kolejności ich stosowania. Przedstawiona w niniejszej pracy metodyka oceny SGP wskazuje, że można uzyskać zbliżone wyniki ilościowe z przeprowadzonych analiz, stosując różne narzędzia programowe (oprogramowanie). Znaczne różnice pojawiły się przy parametrze S_p . Wyjaśnienie tego faktu wymaga dalszych szczegółowych analiz.

Dlatego, dla zapewnienia jakości i powtarzalności, tak ważnym staje się określenie ścisłej procedury przeprowadzania analiz topograficznych.

Autorzy pragną podziękować firmie Andre Abrasive Articles, a zwłaszcza Pani dr Elżbiecie Socha za zaangażowanie i udostępnienie materiałów ściernych do badań. Powyższy artykuł powstał w ramach prac badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki.

8. Literatura

- [1] Zieliński T. P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005.
- [2] Pawlus P.: Topografia powierzchni. Pomiar, Analiza, Oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [3] Wieczorowski M.: Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2009.
- [4] Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistości i chropowatości. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- [5] PN-EN ISO 11562:1998 Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni – Metoda profilowa – Charakterystyki metrologiczne filtrów z korekcją fazy.
- [6] PN-EN ISO 4288:1997 Wymagania geometryczne wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni – Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową.
- [7] Lyons R. G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1999.
- [8] Janecki D.: A generalized L2-spline filter. Measurement, 42/6, 937-943, 2009.
- [9] PN-EN ISO 13565-1:1999 Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni – Metoda profilowa – Powierzchnie o warstwowych właściwościach funkcjonalnych – Filtrowanie i ogólne warunki pomiaru.
- [10] Mainsah E., Greenwood J. A., Chetwynd D. G.: Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Springer Science+Business Media, Dordrecht, 2001.
- [11] ISO/FDIS 25178-2:2011(E) Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.

otrzymano / received: 21.03.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2013

artykuł recenzowany / revised paper