

Analiza rozmieszczenia kieszeni olejowych w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni

Analysis of dimples distribution in surface topography measurements

PRZEMYSŁAW PODULKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.176>

W artykule przedstawiono wpływ rozmieszczenia kieszeni smarowych na eliminację błędu kształtu w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni. Analizowano powierzchnie cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym, z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami olejowymi. Wynikiem pracy było określenie wpływu rozmieszczenia wgłębień smarowych na parametry struktury geometrycznej powierzchni (według normy ISO 25178) po usunięciu błędu kształtu z wykorzystaniem popularnych algorytmów (takich jak: dopasowanie cylindra za pomocą metody najmniejszych kwadratów, aproksymacja wielomianowa n -tego stopnia, filtr odporny na błędy regresji Gaussa) i/lub innych procedur (takich jak filtracja tylko części nośnej powierzchni lub cyfrowe wypełnienie wgłębień).

SŁOWA KLUCZOWE: struktura geometryczna powierzchni, powierzchnie cylindra, kieszenie smarowe, rozmieszczenie kieszeni olejowych

In this paper the influence of distribution of oil pockets on areal form removal in surface topography measurement was taken into consideration. Surface topography of plateau-honed cylinder liners with burnished oil pockets was analyzed. The effect of dimples distribution on surface topography parameters (from ISO 25178 standard) after form removal by commonly used algorithms (cylinder fitted by the least square method, polynomials of n th degree, robust Gaussian filter) and/or other procedures (plateau-part filtering method, digital extraction of valleys) was taken into account.

KEYWORDS: surface topography, cylinder liners, oil pockets, dimples distribution

Analiza struktury geometrycznej powierzchni (SGP) dostarcza szczegółowych informacji o współpracujących ze sobą powierzchniach. Zazwyczaj analizuje się właściwości stereometryczne powierzchni po usunięciu jej zarysu kształtu oraz falistości (będącej rezultatem błędów wykonania badanej części) [1]. Do tej pory wiele prac oraz artykułów naukowych dotyczyło eliminacji nieistotnych składników częstotliwościowych przez stosowanie filtracji cyfrowej. Istnieje wiele algorytmów filtracji, jednak mało prac zostało wykonanych pod względem doboru powierzchni odniesienia oraz jej wpływu na parametry stereometrii powierzchni. Zaleca się, aby element odniesienia dobierać w zależności od rodzaju analizowanej powierzchni [2].

Na niedokładność pomiarów powierzchni – oprócz powierzchni mierzonej, aparatury i procedury pomiarowej – mają wpływ błędna filtracja cyfrowa oraz interpretacja wyników pomiarów [3–5]. Z kolei problemy wynikające z nieprawidłowo przeprowadzonej eliminacji zarysu kształtu są istotne zwłaszcza w przypadku analizy powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych (np. powierzchni cylindrów silników spalinowych) [6].

Do eliminacji zarysu kształtu stosowano: cylinder (jako element geometryczny) [7, 8], wielomiany [9, 10], filtry

cyfrowe (morfologiczne [11], odporne na błędy [12–14]) oraz inne metody [15]. Do procedur wprowadzono także różne modyfikacje filtrów cyfrowych, takie jak: filtracja tylko części nośnej powierzchni [16] czy algorytm oparty na cyfrowym wypełnieniu kieszeni smarowych [17]. Szeroki przegląd metod (oraz błędów) pomiarowych w analizie SGP przedstawiono w [18–21]. Eliminacja zarysu kształtu powierzchni zawierających szerokie wgłębienia stanowi poważny problem, zwłaszcza gdy te kieszenie znajdują się blisko krawędzi badanego detalu.

Autor podjął próbę określenia wpływu rozmieszczenia kieszeni olejowych na usuwanie zarysu kształtu powierzchni cylindrów silników spalinowych.

Analizowane powierzchnie oraz metody pomiarowe

Analizowanymi elementami były powierzchnie cylindrów silników spalinowych po gładzeniu płaskowierzchołkowym, z dodatkowo wygniatanymi kieszeniami smarowymi. Głębokość kieszeni wynosiła od 30 do 120 μm , a szerokość – od 0,4 do 1,2 mm. Badaniom poddano wpływ doboru powierzchni odniesienia na parametry stereometrii powierzchni (według normy ISO 25178). Urządzeniami pomiarowymi były: interferometr światła białego Talysurf CCI Lite (o rozdzielczości pionowej 0,1 nm) oraz profilometr stykowy Talyscan 150 (z końcówką pomiarową o nominalnym promieniu 2 μm). Analizowano ponad 20 powierzchni mierzonych i ponad 20 powierzchni z cyfrowo dodanymi kieszeniami smarowymi. Maksymalny rozmiar powierzchni wynosił 5 mm \times 5 mm (niektóre z elementów powierzchni analizowano w wyodrębnionych profilach i detalach), a krok próbkowania – od 3,27 μm (pomiar optyczny) do 5 μm (pomiar stykowy). Eliminację zarysu kształtu wykonano z wykorzystaniem:

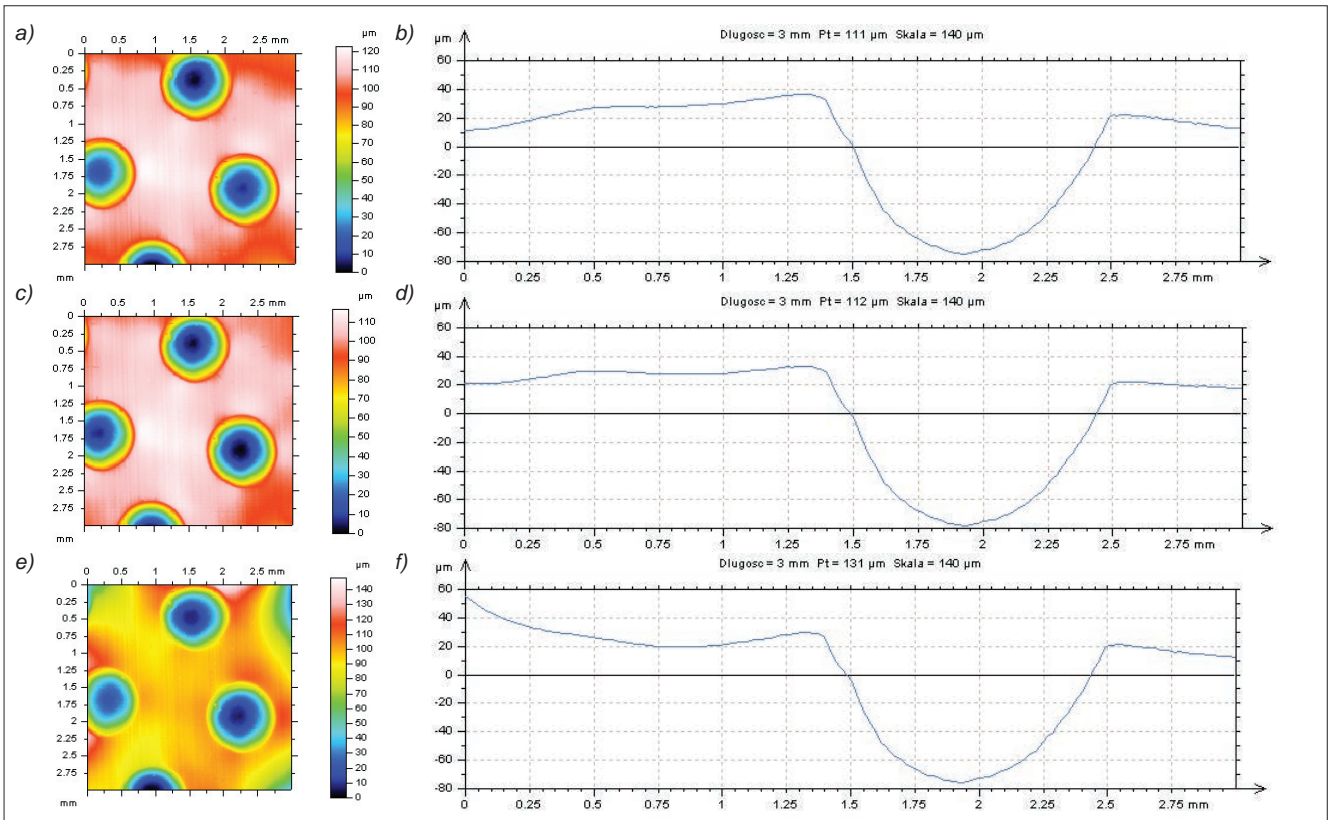
- algorytmu dopasowania cylindra za pomocą metody najmniejszych kwadratów (C_{MKN}),
- wielomianów drugiego, trzeciego i czwartego stopnia (W_2, W_3, W_4),
- filtru cyfrowego (filtru odpornego na błędy Gaussa – F_{GO}).

Badano efekty stosowania algorytmów w zależności od odległości (dystansu) wgłębień (kieszeni) względem siebie (K_{DYS}) oraz od krawędzi analizowanej powierzchni (K_{KRA}) i szerokości (rozmiaru) kieszeni (K_{SZ}); pod uwagę wzięto też długość odcięcia filtru cyfrowego *cut-off* (F_{CO}).

Wyniki badań i ich analiza

Z analizy widoku izometrycznego przedstawionego na rys. 1 wynika, że zastosowanie algorytmu dopasowania elementu geometrycznego w kształcie cylindra (*a*), jak również zastosowanie wielomianów stopnia drugiego (*c*) i czwartego (*e*) może nie zapewnić całkowitego usunięcia krzywizny; brak prawidłowo dobranej powierzchni odniesienia można zaobserwować na wyodrębnionych profilach (*b*, *d* oraz *f*). Zwiększenie stopnia wielomianu spowodowało wzrost zniekształceń kieszeni olejowych.

* Dr inż. Przemysław Podulka (p.podulka@prz.edu.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej



Rys. 1. Powierzchnie cylindra po eliminacji zarysu kształtu za pomocą C_{MINK} (a), W_2 (c) i W_4 (e) oraz przykładowe profile (b, d, f)

Jeżeli $K_{DYS} < 1$ mm i/lub $K_{KRA} < 0,5$ mm, wtedy zastosowanie wielomianów (nawet drugiego stopnia) mogło spowodować zniekształcenia powierzchni odniesienia oraz samych kieszeni smarowych.

Do eliminacji zarysu kształtu powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych często stosuje się filtr odporny na błędy regresji Gaussa. Charakteryzuje się on znacznie większą (w porównaniu z regularnym filtrem Gaussa) odpornością na elementy nieregularne (pojedyncze wierzchołki typu szpilki, wgłębienia).

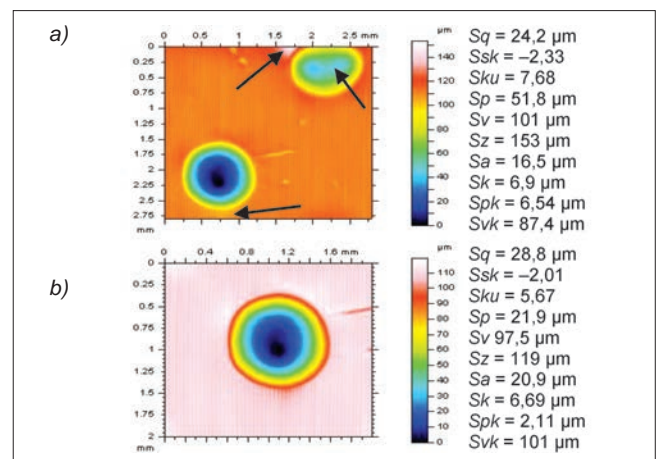
Jeżeli $K_{KRA} < F_{CO}$, wówczas zniekształcenie wgłębienia smarowego (również części powierzchni między krawędzią a kieszenią smarową) wzrastało; położenie powierzchni odniesienia było określone nieprawidłowo. Niejednokrotnie zniekształceniem nie ulegały kieszenie smarowe, lecz tylko obszar pomiędzy wgłębieniem a krawędzią powierzchni; w przypadku gdy wgłębienie smarowe znajdowało się bezpośrednio przy/na krawędzi analizowanego detalu, zniekształcenie osiągało wartości maksymalne (rys. 2a). Zmiany można było zaobserwować także na obszarach przylegających do wgłębien smarowych, a nieznajdujących się blisko ($K_{KRA} > 1$ mm) krawędzi analizowanej powierzchni (rys. 3a i b). Zniekształcenia wgłębien mogą negatywnie wpływać na parametry stereometrii powierzchni: wartość maksymalnej wysokości wzniesienia powierzchni Sp może zostać zawyżona ponad dwukrotnie, maksymalna wysokość powierzchni Sz może wzrosnąć o ponad 30%, zredukowana wysokość wierzchołków Spk może zostać zawyżona ponad trzykrotnie, a zredukowana głębokość dolin Svk może zmaleć o ok. 14% (rys. 2).

Jeżeli $K_{DYS} < K_{SZ}$, wówczas zniekształcenie obszaru znajdującego się między wgłębieniami wzrastało, nawet gdy $F_{CO} > K_{SZ}$ (rys. 4b). Jeśli zaś $K_{SZ} < K_{DYS}$ oraz $K_{SZ} < F_{CO}$, wtedy zniekształcenie wgłębien smarowych oraz ich obszarów sąsiednich (także obszarów znajdujących się pomiędzy kieszeniami lub pomiędzy kieszeniami

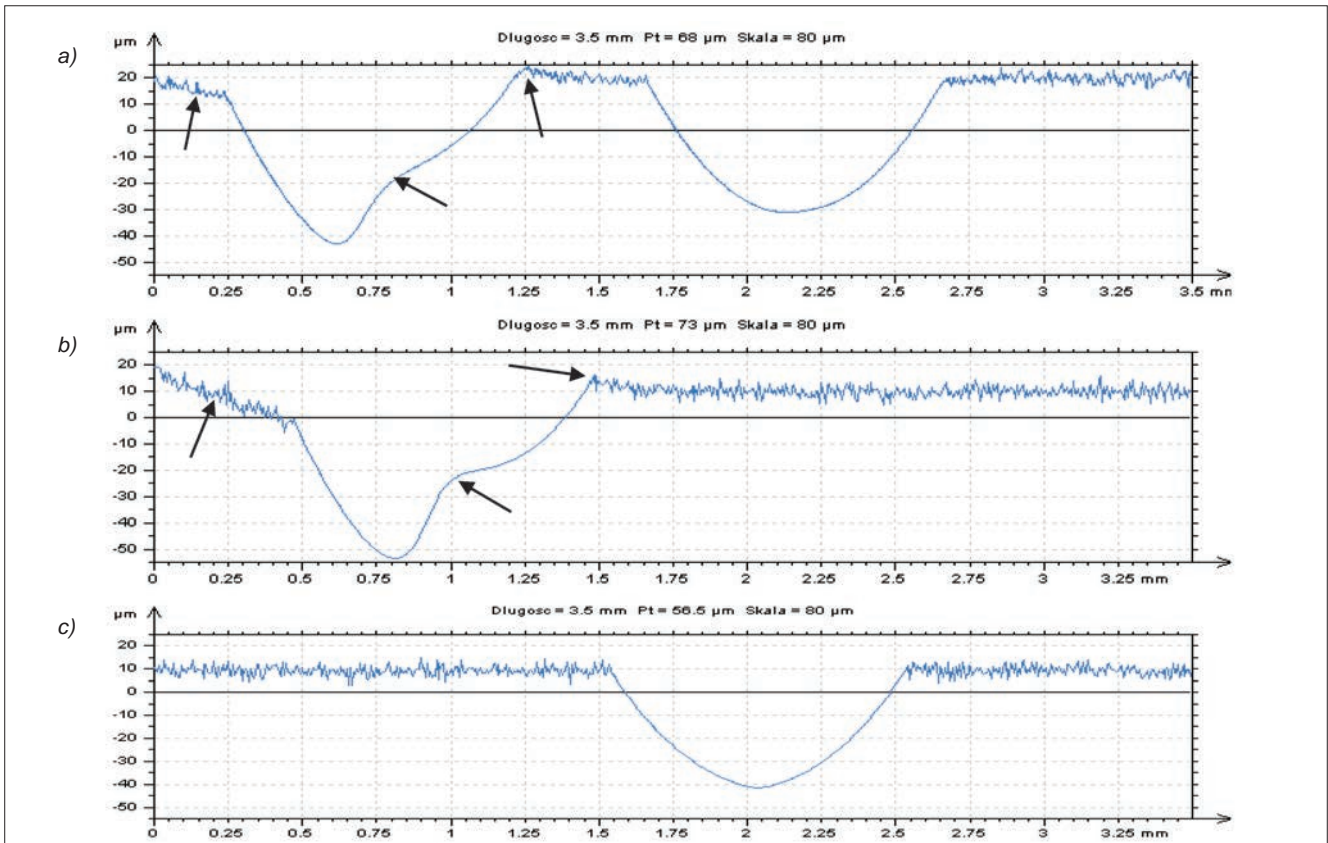
a brzegiem analizowanego detalu) nie występowało lub występowało w stopniu minimalnym (rys. 4a).

Analizując detale wyodrębnione z powierzchni (rys. 5) po eliminacji zarysu kształtu, wyciągnięto następujące wnioski. Zastosowanie aproksymacji wielomianowej (W_2 , W_3 lub W_4) spowodowało nieprawidłowe określenie położenia powierzchni odniesienia, jeżeli $K_{DYS} < 1$ mm; niejednokrotnie zniekształcenie wzrastało także przy $K_{KRA} < 0,5$ mm.

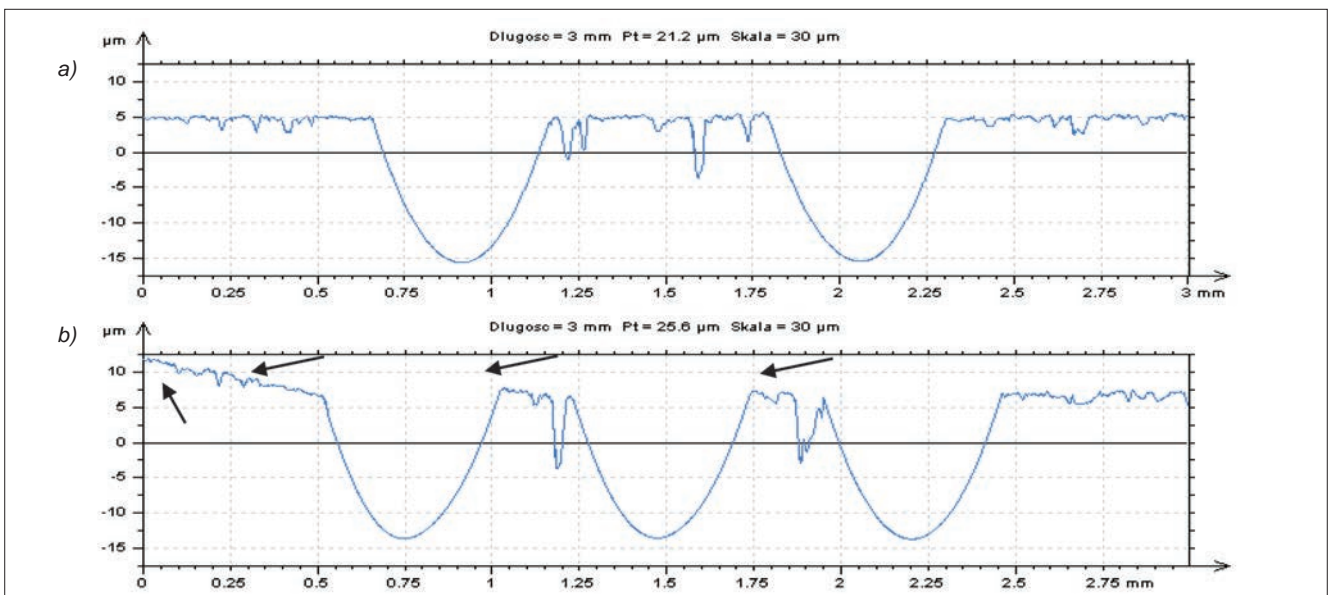
Dzięki zastosowaniu F_{GO} otrzymano najmniejsze wartości analizowanych parametrów stereometrii powierzchni. Średnie kwadratowe odchylenie powierzchni Sq było dwukrotnie mniejsze po zastosowaniu filtracji cyfrowej w porównaniu z wielomianami, wartości parametrów Sp i Sz zmalały o ponad 40%, a parametr Spk zmalał o ponad 65%. Zastosowanie filtracji cyfrowej jest konieczne ze względu na zmniejszenie błędów w określaniu parametrów stereometrii powierzchni.



Rys. 2. Powierzchnie cylindra (oraz odpowiednio ich parametry SGP) po usunięciu zarysu kształtu za pomocą F_{GO} ($F_{CO} = 0,8$ mm), zawierające wgłębienia smarowe o różnorodnym położeniu: kieszenie rozmieszczone blisko/na krawędzi analizowanego detalu (a) oraz centralnie (b)



Rys. 3. Profile powierzchni po zastosowaniu F_{GO} ($F_{CO} = 0,8$ mm): a) $K_{KRA} = 0,25$ mm, b) $K_{KRA} = 0,5$ mm, c) $K_{KRA} = 1$ mm



Rys. 4. Profile powierzchni po filtracji cyfrowej: a) $K_{DYS} = 0,6$ mm, b) $K_{DYS} = 0,25$ mm

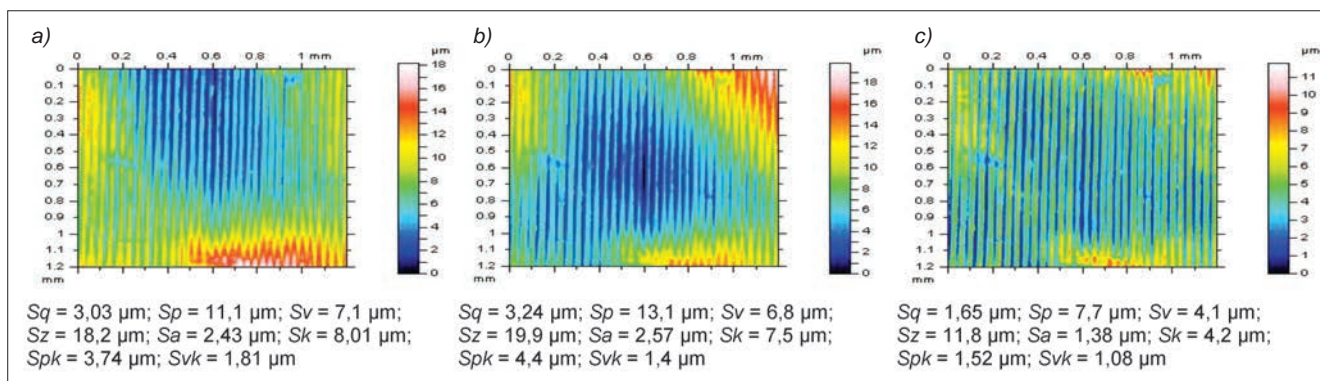
Błędy w określaniu parametrów stereometrii powierzchni mogą być spowodowane cyfrowym zniekształceniem analizowanych wgłębień smarowych podczas eliminacji zarysu kształtu.

Jeżeli $K_{SZ} > 0,5$ mm, konieczne jest zastosowanie filtra cyfrowego (F_{GO}) zamiast algorytmów dopasowania cylindra czy aproksymacji wielomianowej (drugiego lub wyższego stopnia).

Błędy w analizie SGP (określeniu wartości parametrów) mogą być minimalizowane przez zmniejszenie cyfrowych zniekształceń kieszeni olejowych. Błędny dobór powierzchni odniesienia wpływa z kolei na wyznaczenie parametrów stereometrii powierzchni i może spowodować,

że poprawnie wykonane elementy zostaną uznane za braki. Jeżeli powierzchnia zawiera wgłębienia smarowe o $0,5$ mm $< K_{SZ} < F_{CO}$, wtedy zastosowanie filtrów odpornych na błędy pozwala na prawidłową eliminację zarysu kształtu (można uzyskać prawidłowe położenie powierzchni odniesienia w miejscach występowania kieszeni olejowych). Jednakże zastosowanie $F_{CO} > 0,8$ mm nie zawsze spowoduje całkowite wyeliminowanie błędu kształtu.

Dla powierzchni zawierających wgłębienia smarowe o $K_{SZ} > 0,8$ mm zaleca się stosowanie alternatywnych procedur (np. algorytmu opartego na filtracji tylko części nośnej powierzchni lub procedury cyfrowego wypełnienia kieszeni smarowych).



Rys. 5. Detale wyodrębnione z powierzchni (wraz z parametrami wysokościowymi) po usunięciu zarysu kształtu za pomocą: a) W_2 , b) W_4 , c) F_{60} ($F_{CO} = 0,8 \text{ mm}$)

Wnioski

Analiza wyników badań przedstawionych w artykule pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Aplikacja algorytmu dopasowania cylindra metodą najmniejszych kwadratów nie pozwoliła na prawidłową eliminację błędu kształtu, gdy $K_{SZ} > 0,5 \text{ mm}$ – przy doborze powierzchni odniesienia w tym przypadku należy się posłużyć aproksymacją wielomianową lub filtracją cyfrową.
- Zastosowanie aproksymacji wielomianowej drugiego stopnia pozwala na prawidłowy dobór powierzchni odniesienia, jeżeli $K_{SZ} < 0,5 \text{ mm}$, $K_{DYS} > 1 \text{ mm}$ i $K_{KRA} > 0,5 \text{ mm}$; w przeciwnym razie zniekształcenia wgłębień smarowych oraz obszarów pomiędzy kieszeniami a krawędziami analizowanego detalu wzrastały – wtedy zaleca się zastosowanie filtracji cyfrowej.
- Filtracja odporna na błędy regresji Gaussa wprowadziła zniekształcenia kieszeni smarowych (również części powierzchni usytuowanych pomiędzy krawędzią a wgłębieniem), gdy $K_{KRA} < F_{CO}$. Nieprawidłowości w określeniu powierzchni odniesienia można było także zaobserwować na obszarach detalu przylegających do kieszeni smarowych, znajdujących się powyżej 1 mm od krawędzi powierzchni ($K_{KRA} > 1 \text{ mm}$).
- Podczas stosowania filtracji cyfrowej (przy zachowaniu warunku $K_{DYS} < K_{SZ}$) zniekształcenia obszaru między wgłębieniami wzrastały (nawet dla $F_{CO} > K_{SZ}$). Jeżeli $K_{SZ} < K_{DYS}$ oraz $K_{SZ} < F_{CO}$, zniekształcenie kieszeni smarowych oraz ich obszarów sąsiednich (również obszarów znajdujących się pomiędzy kieszeniami i/lub pomiędzy kieszeniami a brzegiem analizowanej powierzchni) nie występowało lub było znikome.
- Do eliminacji zarysu kształtu powierzchni cylindrycznych, zawierających wgłębienia smarowe (gdzie $K_{SZ} > 0,5 \text{ mm}$), zaleca się stosowanie filtracji cyfrowej zamiast algorytmów dopasowania cylindra lub wielomianów (również drugiego stopnia).
- W przypadku powierzchni cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym, zawierających szerokie wgłębienia ($K_{SZ} > 0,5 \text{ mm}$), do zminimalizowania zniekształceń kieszeni smarowych (podczas eliminacji błędów kształtu) alternatywnie można stosować procedury filtracji tylko części nośnej powierzchni lub cyfrowego wypełnienia wgłębień.
- Do eliminacji błędów kształtu powierzchni cylindrów zawierających szerokie wgłębienia zaleca się stosowanie filtru odpornego na błędy regresji Gaussa. Należy też zwrócić uwagę na położenie powierzchni odniesienia w miejscach występowania kieszeni smarowych. Jeżeli $K_{SZ} > 0,8 \text{ mm}$, filtr cyfrowy może nie zapewnić prawidłowego

określenia położenia powierzchni odniesienia – należy wówczas zastosować alternatywne procedury cyfrowe (filtrację tylko części nośnej powierzchni lub algorytm z cyfrowo wypełnionymi kieszeniami smarowymi).

LITERATURA

1. Leach R. "Characterisation of areal surface texture". Berlin: Springer-Verlag, 2013.
2. Stout K.J., Sullivan P.J., Dong W.P., Mainsah E., Luo N., Mathia T., Zahouani H. "The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions". Publication EUR 15178 EN Commission of the European Communities, 1993.
3. Blunt L., Jiang X. "Advanced Techniques for Assessment of Surface Topography". London: Kogan Pages, 2003.
4. Whitehouse D.J. "Handbook of Surface Metrology". Bristol, Philadelphia: Inst. of Physics, 1994.
5. Thomas T.R. "Rough Surfaces. Second Edition". London: Imperial College Press, 1999.
6. Podulka P., Dobrzański P., Pawlus P., Lenart A. "The effect of reference plane on values of areal surface topography parameters from cylindrical elements". *Metrol. Meas. Syst.* 21, 2 (2014): s. 247–256.
7. Forbes A.B. "Least squares best fit geometric elements". NLP report DITC 40 (89), Teddington, UK, 1989.
8. Podulka P. "Selection of reference plane by the least squares fitting methods". *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 30, 10 (2016): s. 164–175.
9. Sullivan P.J. "Surface topography filtering". *Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. Springer, 2001.
10. De Chiffre L., Lonardo P., Trumpold H., Lucca D.A., Goch G., Brown C.A., Raja J., Hansen H.N. "Quantitative Characterisation of Surface Texture". *CIRP Ann. Manuf. Techn.* 49, 2 (2000): s. 635–642, 644–652.
11. Lou S., Jiang X., Scott P.J. "Applications of morphological operations in surface metrology and dimensional metrology". *J. Phys. Conf. Ser.* 483 (2014): s. 012020.
12. Brinkman S., Bodschinna H. "Advanced Gaussian filters". *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography*. London, Sterling: Kogan Page Science, 2003, s. 62–89.
13. Brinkman S., Bodschinna H., Lemke H.-W. "Development of a robust Gaussian regression filter for three-dimensional surface analysis". *X International Colloquium on Surfaces*. Chemnitz, Germany, 2000, s. 122–131.
14. Dobrzański P., Pawlus P. "A study of filtering techniques for areal surface topography assessment". *Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf.* 225, 11 (2011): s. 2096–2107.
15. Muralikrishnan B., Raja J. "Computational surface and roundness metrology". Springer, 2009.
16. Pawlus P., Dobrzański P., Podulka P. „Modyfikacja filtru cyfrowego w odniesieniu do powierzchni zawierających szerokie wgłębienia”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 291–298.
17. Podulka P., Pawlus P., Dobrzański P. „Wyodrębnianie wgłębień na powierzchniach cylindrycznych”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1700–1701.
18. Wieczorowski M., Pawlus P., Mathia T. "The errors of stylus methods in surface topography measurements". Szczecin: ZAPOL, 2014.
19. Wieczorowski M. „Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni”. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2009.
20. Podulka P. "Problem of selection of reference plane with deep and wide valleys analysis". *22nd World Congress on the International Measurement Confederation (IMEKO)*, 3–6 September 2018, Belfast, UK [in press].
21. Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M. "Recent trends in surface metrology". *Wear*. 271, 3–4 (2011): s. 494–508. ■