

Nowe metody geometryczne w wieloskalowej analizie topografii powierzchni: nachylenie i krzywizna

Novel geometric methods in multiscale analysis: curvature and slope

TOMASZ BARTKOWIAK *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.171>

Przedmiotem artykułu jest przedstawienie nowych, geometrycznych metod wieloskalowych w opisie topografii powierzchni. Istotnym zagadnieniem w inżynierii powierzchni jest znalezienie zależności funkcyjnych między procesem wytwarzania a uzyskaną topografią lub między topografią a zjawiskami występującymi w trakcie jej oddziaływania z otoczeniem (np. tarcie, wytrzymałością zmęczeniową czy refleksyjnością). Właściwości geometryczne chropowatych powierzchni zmieniają się wraz ze skalą obserwacji, wynikającą z pomiaru lub obliczeń. Skoncentrowano się na dwóch nowych metodach analizujących nachylenie i krzywiznę. Krzywizna jest przedstawiana jako tensor, którego komponenty opisują maksymalną i minimalną krzywiznę, w tym ich wartości i kierunki. Nachylenie jest rozumiane jako orientacja w przestrzeni wektora normalnego do powierzchni. Przedstawiono przykładowe korelacje między nachyleniem i krzywizną a parametrami opisującymi ich oddziaływanie z otoczeniem i proces wytwarzania, wskazując na ich duży potencjał w rozwoju wieloskalowego opisu topografii powierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: metrologia powierzchni, metody wieloskalowe, krzywizna, nachylenie, korelacje

The aim of this paper is to demonstrate the use of novel geometric multiscale methods in the characterization of surface topographies with a view to establishing functional relations between formation processes and resulted topography or between topography and its performance during interaction with the environment (e.g. friction, fatigue or gloss reflectance). Geometric properties of rough surfaces change with the scale of observation, i.e., measurement or calculation. In this paper, I focus on two novel method, which analyse slope and curvature in multiple scales. The digital nature of measured surfaces is recognized and is not smoothed to fit a continuous function to the measured heights. Curvature is represented as a second order tensor, which components describe maximal and minimal curvatures and their directions. In order to describe curvature distributions for analyzed regions, statistical parameters, such as: mean and standard deviation, are used. Those measures are utilized to find correlations between them and certain formation or performance parameters. The other method described here bases on slope. In this work, two calculation techniques are presented using orientation normal vectors estimated through covariance matrix method or cross product. As a result of further processing, 3D distributions of

direction cosines are obtained, based on which multivariate statistical parameters are calculated (incl. measures of dispersion and higher statistical moments). This paper also presents the sample strong correlations between slope or curvature, for actual measured textures, and manufacturing or performance parameters. This indicates a great potential of those two methods in the development of multiscale characterization of surface topographies.

KEYWORDS: surface metrology, multiscale methods, curvature, slope, correlations

Topografia powierzchni wpływa na szereg zjawisk mających związek z interakcją tej powierzchni z otoczeniem. Jednocześnie większość procesów wytwarzania kształtuje topografię powierzchni. Topografia składa się z indywidualnych cech fizycznych o różnej wielkości (takich jak: pęcherze, rowki czy mikrokratery) i często wydaje się inna, gdy obserwuje się ją w innej skali pomiaru. Zachodzi więc potrzeba rozważań wieloskalowych.

Pojęcie skali ma wiele znaczeń. W metrologii najczęściej odnosi się do stosunku odległości na obiekcie będącym wynikiem pomiaru rzeczywistej powierzchni do właściwej odległości na rzeczywistej powierzchni.

W nowym rozumieniu skala stanowi pewne okno, przez które obserwuje się obiekt [1]. Pomiar jest zbiorem określonego zakresu długości fal albo częstotliwości. Pojęcie skali często utożsamia się z wielkością czy rozmiarem, co wynika z faktu, że pewne cechy powierzchni (rysy, zagłębienia, pory itd.) o danym rozmiarze czy wielkości można najlepiej dostrzec, gdy obserwuje się je w pewnej skali lub przedziale skal. Skala może wynikać z zastosowanego przyrządu pomiarowego i w takim przypadku zależy od interwału próbkowania powierzchni. Może być również przeliczana w zależności od zastosowanej metody wieloskalowej.

Zjawiska fizyczne zależne od topografii powierzchni mogą być związane z oddziaływaniami, które zachodzą w kilku skalach interakcji. Zmiana topografii powierzchni w wyniku procesu wytwarzania lub zużycia również może zachodzić w kilku skalach. Kluczowe staje się zatem zrozumienie zależności pomiędzy topografią powierzchni a procesami w trakcie jej wytwarzania albo jej interakcji z otoczeniem.

Powiązania te będą zależały od metody pomiaru powierzchni, analizy wyniku pomiaru i jej charakterystyki w wielu skalach. Przez charakteryzację rozumie się opis liczbowy danych pomiarowych.

* Dr inż. Tomasz Bartkowiak (tomasz.bartkowiak@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska

TABLICA. Charakterystyka stosowanych obecnie metod wielkoskalowych [1]

Typ	Cecha geometryczna	Parametr wieloskalowy	Pochodna po skali
Związane z wymiarem			
1D	długość	długość względna	złożoność typu długość – skala
2D	powierzchnia	powierzchnia względna	złożoność typu powierzchnia – skala
3D	objętość (wypełnienie)	głębokość tekstury powierzchni	dotąd nieużywana
Pochodne			
1. rzędu	nachylenie	dotąd nieużywana	dotąd nieużywana
2. rzędu	krzywizna 2D	statystyki jednowymiarowe dla profilu	dotąd nieużywana
2. rzędu	krzywizna 3D	statystyki dla parametrów tensora	dotąd nieużywana

Topografia powierzchni może się zmieniać w zależności od skali jej obserwacji. Istotne cechy topografii powierzchni, wpływające na jej zachowanie się w trakcie interakcji z otoczeniem, mogą dotyczyć jej kształtu, falistości, chropowatości albo mikrochropowatości. Nieregularność topografii powierzchni powoduje, że wartości parametrów opisujących topografię w danej skali zależą od skali pomiaru albo od skali obliczeniowej. Najczęściej istotna jest tylko grupa skali (innymi słowy: jej wąski zakres), dla której zauważa się znaczący wpływ danego parametru opisującego topografię na jej interakcję z otoczeniem lub parametru procesu wytwarzania na parametr opisujący otrzymaną topografię.

Wykorzystywane obecnie metody wieloskalowe obejmują:

- metody konwencjonalne, w których dokonuje się: pomiaru w wielu skalach; pomiaru w jednej skali i stosuje się transformację Fouriera; pomiaru w jednej skali i stosuje się filtrację za pomocą filtru morfologicznego [2];
- metodę pomiaru w jednej skali i zastosowanie transformacji falkowej [3, 4];
- metodę pomiaru w jednej skali i zastosowanie wpływającego filtru pasmowego [5];
- metodę pomiaru w jednej skali i zastosowanie funkcji strukturalnej [6];
- metody geometryczne [7, 8].

W przypadku metod geometrycznych można zauważyć, że własności geometryczne chropowatych powierzchni zmieniają się wraz ze skalą obserwacji bądź skalą obliczeniową. Zestawienie metod geometrycznych zawarto w tablicy [1]. Pochodne traktowane są jako różnice skończone, ponieważ dane pomiarowe są przeważnie zbiorem punktów, a nie sygnałem ciągłym.

Krzywizna

Krzywizna powierzchni stanowi obecnie istotne zagadnienie w analizie wieloskalowej. Podobnie jak topografia krzywizna powierzchni zmienia się wraz ze skalą, lecz ma tę unikatową cechę, że nie zmienia swojej wartości w zależności od układu odniesienia. Po raz pierwszy w analizie wieloskalowej krzywizna powierzchni została użyta do wieloskalowego opisu profilów chropowatości powierzchni obrobionych za pomocą śrutowania. Profile zostały wyeksportowane z trójwymiarowych pomiarów powierzchni, wykonanych za pomocą mikroskopu konfokalnego. Krzywiznę dla profilu oblicza się z zastosowaniem wzoru Herona dla trzech sąsiednich punktów lub z zastosowaniem zapisu różnicowego dla krzywizny krzywej 2D. Krzywizna może charakteryzować obszary wklęsłe lub wypukłe, na co wskazuje znak krzywizn głównych tych obszarów.

W przypadku pomiarów powierzchniowych możliwe jest wyznaczenie tensora krzywizny $\mathbf{T}$ dla danego fragmentu zmierzonej topografii. Tensor krzywizny może być przedstawiony jako macierz 3×3 :

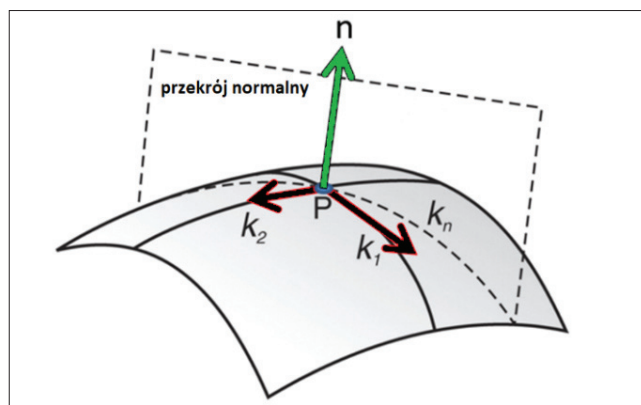
$$\mathbf{T} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{P}^{-1} \quad (1)$$

gdzie:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{n}) \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \kappa_1 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Wielkości κ_1 oraz κ_2 są krzywiznami głównymi (odpowiednio maksymalną i minimalną). Wektory własne $\mathbf{k}_1$ i $\mathbf{k}_2$ są kierunkami głównymi, wokół których powierzchnia zakrzywia się najbardziej i najmniej. Wektor $\mathbf{n}$ jest wektorem normalnym do dwóch wspomnianych wektorów głównych $\mathbf{k}_1$ i $\mathbf{k}_2$ (rys. 1).



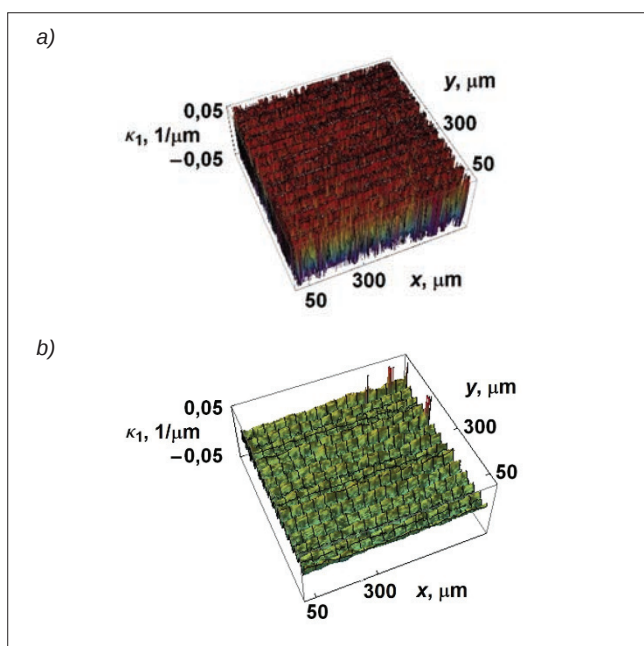
Rys. 1. Kierunki główne tensora krzywizny oraz wektor normalny do nich

Stosuje się także kombinację krzywizny maksymalnej oraz minimalnej, tzn. krzywiznę średnią (H) oraz Gaussa (K), które dane są wzorami:

$$H = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \quad (4)$$

$$K = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad (5)$$

W pracy [9] przedstawiono zbiór parametrów opisujących rozkłady krzywizny maksymalnej, minimalnej, średniej oraz Gaussa. Parametry te są analogiczne do parametrów opisujących rozkład wysokości zmierzonych punktów topografii, jak Ra , Rq czy Sa i Sq .



Rys. 2. Krzywizna maksymalna κ_1 powierzchni po obróbce kierunkowej, obliczona dla dwóch skal: a) 1,92 μm , b) 9,61 μm

Przykładowe rozkłady krzywizny dla zmierzonych próbek po konwencjonalnej obróbce skrawaniem dla dwóch różnych skal przedstawiono na rys. 2.

Metoda wieloskalowej topografii powierzchni była z powodzeniem wykorzystywana do opisu topografii powierzchni uzyskanych metodą addytywną [10] oraz po obróbce mikroelektroerozyjnej – w tym przypadku znaleziono silne zależności funkcjonalne pomiędzy energią wyładowania a wynikową krzywizną powierzchni [11]. Obecnie trwają prace nad kolejnymi zastosowaniami tego parametru do opisu kierunkowości (anizotropii) powierzchni oraz lepszego opisu innych powierzchni obrabianych metodami niekonwencjonalnymi.

Nachylenie

Analogicznie jak w przypadku krzywizny, wraz ze skalą i położeniem (x, y) zmienia się również nachylenie powierzchni. Dotychczas ta wielkość nie była wykorzystywana, poza geologią i oceanografią [12, 13], w analizie wieloskalowej topografii powierzchni. Zgodnie z ISO 25178 parametr Re/A (powierzchnia względna) opiera się na nachyleniach postępujących po sobie punktów, wyrażonych przez cosecans kąta nachylenia. Analiza rozkładu nachyleń dla całego zbioru danych pomiarowych, podobnie jak w analizie rozkładu zmierzonych wysokości, umożliwia wyznaczenie parametrów statystycznych tych rozkładów, a następnie ich powiązanie z parametrami procesu wytwarzania lub interakcji.

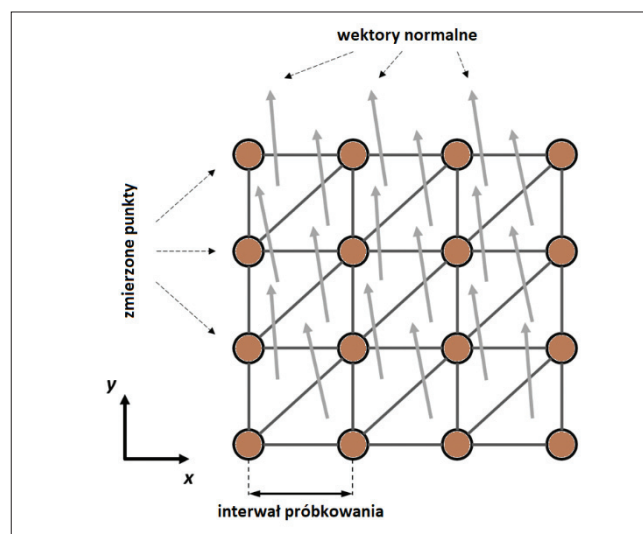
Autor proponuje, by w przypadku pomiarów powierzchniowych dla każdej skali obliczeniowej lub pomiarowej wyznaczać dla zmierzonej chmury punktów wektory normalne dla tych punktów lub dla trójkątnych elementów powstałych z triangulacji chmury punktów (rys. 3).

Istnieje wiele metod obliczania wektorów normalnych dla chmury

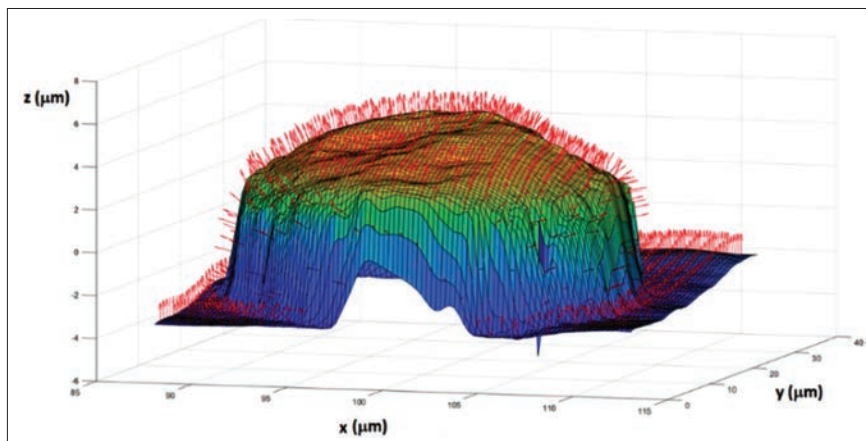
punktów. W niniejszym artykule do celów porównawczych przedstawiono metody wieloskalowe, gdzie wektory normalne są obliczane za pomocą iloczynu wektorowego i za pomocą macierzy kowariancji.

Wyznaczone wektory normalne (rys. 4), opisane w trójwymiarowej przestrzeni, mają dwa kąty określające ich orientację względem płaszczyzny odniesienia (xy). Dla każdego z tych kątów można następnie obliczyć wartości funkcji trygonometrycznych, takich jak sinus, cosinus czy tangens, a także ich odwrotności, tj. secans, cosecans oraz cotangens. Traktując te dwie wartości kątowe jako zależne, można wykreślić rozkład trójwymiarowy (rys. 5) kątów lub ich wartości trygonometrycznych dla danej skali obliczeniowej, a następnie – wartości statystyk takiego rozkładu. Ponieważ rozkłady tego typu należą do wielowymiarowych, dlatego zaleca się w tym przypadku skorzystanie ze statystyk przeznaczonych do takich zagadnień, np. z: uogólnionej wariancji, wielowymiarowego odchylenia średniej, wielowymiarowego odchylenia mediany czy wielowymiarowej kurtozy.

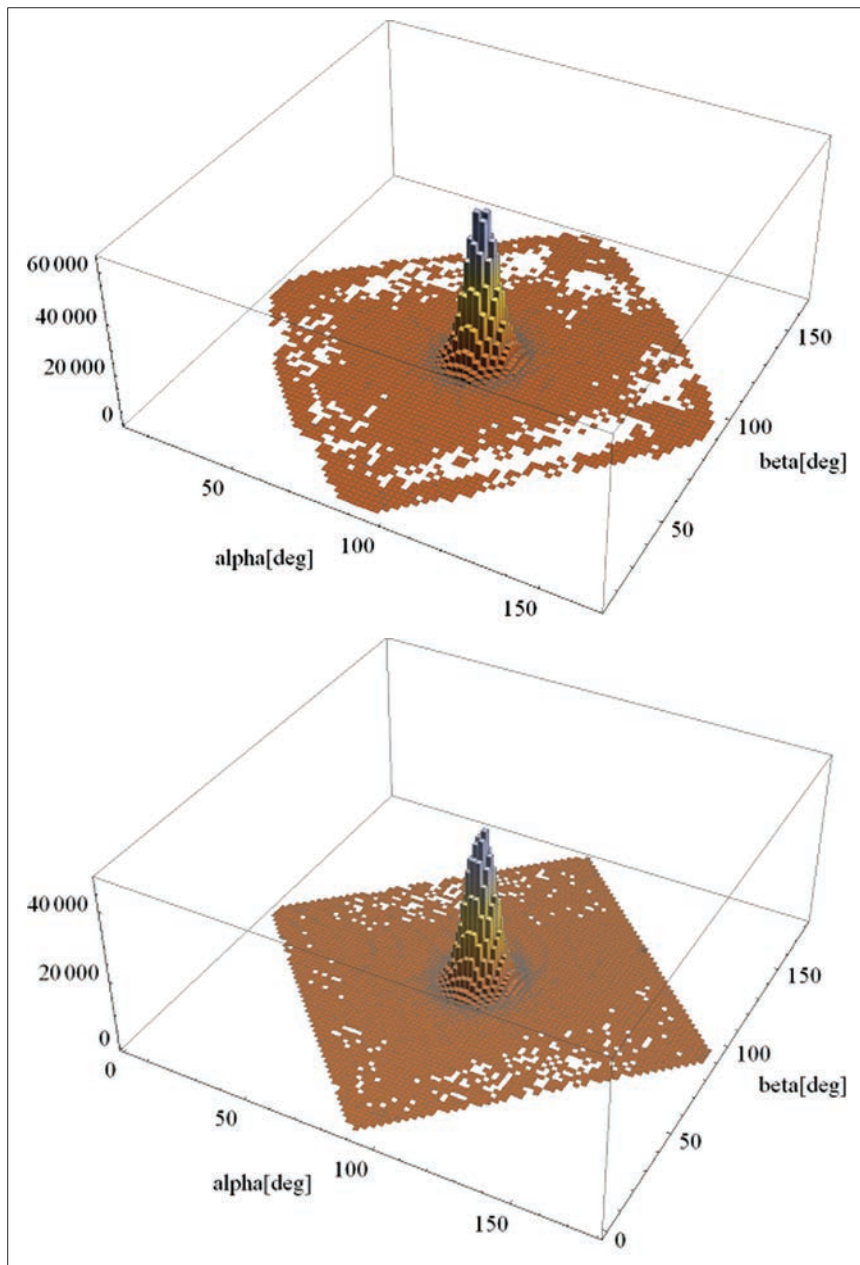
Metodę wieloskalowej analizy nachylenia wykorzystano do analizy topografii 20 próbek różnego rodzaju papieru fotograficznego. Zaobserwowano silne korelacje ($R^2 > 0,9$) pomiędzy parametrem opisującym refleksyjność powierzchni a wielowymiarową kurtozą dla kąta nachylenia wektora normalnego, obliczonego za pomocą iloczynu wektorowego. Prace nad tym zagadnieniem są obecnie w trakcie realizacji.



Rys. 3. Triangulacja chmury punktów pomiarowych oraz obliczone wektory normalne dla trójkątów



Rys. 4. Obliczone wektory normalne dla fragmentu powierzchni papieru fotograficznego (render dzięki uprzejmości Davida Etievanta)



Rys. 5. Obliczone rozkłady wielowymiarowe kątów nachylenia wektorów normalnych dla dwóch różnych skal obliczeniowych

Podsumowanie

Obecnie się przypuszcza, że o wiele więcej zjawisk ma wpływ na topografię powierzchni lub jest od niej bezpośrednio zależnych, niż wynika to z dowodów w postaci analiz, bezsprzecznie potwierdzających w sposób jakościowy i ilościowy spodziewane powiązania. Analizy wieloskalowe są narzędziem, które pozwala na znalezienie takich zależności w sposób funkcyjny.

Rozwój metod geometrycznych powinien się przyczynić do lepszego poznania zjawisk rządzących powstawaniem topografii w wyniku procesów fizykochemicznych oraz oddziaływań powierzchni z otoczeniem. Z drugiej strony ogromna liczba parametrów opisujących powierzchnie nadal bywa niewystarczająca do zrozumienia złożoności tego typu zagadnień. Analizy wieloskalowe wymagają – od badaczy czy użytkowników komercyjnych systemów pomiarowych – szerszej wiedzy z zakresu analiz czy statystyki. Krokiem naprzód w kierunku popularyzacji tych metod jest dostępność takich narzędzi w komercyjnym

oprogramowaniu MountainsMap, które od niedawna oferuje możliwość przeprowadzenia analizy długość-skala oraz powierzchnia-skala. Autor ma nadzieję, że zaproponowana analiza wieloskalowa zwiększy zainteresowanie naukowców i przemysłu tym zagadnieniem oraz pozwoli na lepsze zrozumienie natury chropowatych powierzchni.

Opisane w artykule badania zostały sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach dotacji 02/22/ /DSPB/1431.

LITERATURA

1. Brown C.A., Hansen H.N., Jiang X.J., Blateyron F., Berglund J., Senin N., Bartkowiak T., Dixon B., Le Goïc G., Quinsat Y., Stemp W.J., Thompson M.K., Ungar P.S., Zahouani H. "Multiscale analyses and characterizations of surface topographies". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 67, 2, s. 839–862.
2. ISO 25178-2 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2.
3. Zahouani H., Lee S.-H., Vargiolu R. "The Multiscale Mathematical Microscopy of Surface Roughness, Incidence in Tribology, Lubrication at the Frontier: The Role of the Interface and Surface Layers in the Thin Film and Boundary Regime", s. 379–390.
4. Jiang X., Blunt L., Stout K. "Three-dimensional surface characterization for orthopaedic joint prostheses". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 213, 1, s. 49–68.
5. Berglund J., Brown C.A., Rosén B.-G., Bay N. "Milled die steel surface roughness correlation with steel sheet friction". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 59, 1, s. 577–580.
6. Sayles R.S., Thomas T.R. "The spatial representation of surface roughness by means of the structure function: a practical alternative to correlation". *Wear*. 42, s. 263–276.
7. Brown C.A., Charles P.D., Johnsen W.A., Chesters S. "Fractal analysis of topographic data by the patchwork method". *Wear*. 161, 1–2, s. 61–67.
8. Underwood E.E., Banerji K. "Fractals in fractography". *Materials Science and Engineering*. 80, 1, s. 1–14.
9. Bartkowiak T., Berglund J., Brown C.A. "Establishing functional correlations between multiscale areal curvatures and coefficients of friction for machined surfaces". *Surface Topography: Metrology and Properties*. 6, 3, s. 9.
10. Zhang X., Drake N.A., Wainwright J., Mulligan M., Hansen H.N., Brown C.A. "Multi-scale areal curvature analysis of fused deposition surfaces". *Proceedings – ASPE 2015 Spring Topical Meeting: Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing*, s. 77–82.
11. Bartkowiak T., Brown C.A. "A characterization of process-surface texture interactions in micro-electrical discharge machining using multiscale curvature tensor analysis". *Transactions of the ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 140, 2, doi:10.1115/1.403760.
12. Zhang X., Drake N.A., Wainwright J., Mulligan M. "Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and a fractal method for their solution". *Earth Surface Processes and Landforms*. 24, 9, s. 763–779.
13. Young G.C., Dey S., Rogers A.D., Exton D. "Cost and time-effective method for multiscale measures of rugosity, FD, and vector dispersion from coral reef 3D models". *Plos One*. 12, 4, e0175341.