



## Badania wpływu wybranych nowych metod filtracji na chropowatość powierzchni wzorcowych

### Study the influence of selected new filtration methods on roughness of standard surfaces

ANETA ŁĘTOCHA\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.3.43>

Przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie wpływu nowych metod filtracji na chropowatość powierzchni wzorcowych – sinusoidalnej (typu C) i losowej (typu D). Wybrano trzy metody filtracji: odporny filtr Gaussa, filtr funkcjami sklejanymi i filtry morfologiczne. Badania przeprowadzono z zastosowaniem metody stykowej oraz profilowania konfokalnego (metody optycznej). Analizowano wybrane wysokościowe parametry chropowatości profilu i powierzchni.

**SŁOWA KLUCZOWE:** nowe metody filtracji, odporny filtr Gaussa, filtr funkcjami sklejanymi, filtry morfologiczne, struktura geometryczna powierzchni

*Paper presents the results of research in order to determine the impact of selected new filtration methods on roughness results of standard surfaces – sinusoidal (C type) and random (D type). Three filtering methods were chosen: robust Gaussian filter, spline filter, morphological filters. Studies with use contact method and confocal profiling method (optical) were made. Results of selected height roughness profile and surface parameters were analysed.*

**KEYWORDS:** new filtration methods, robust Gaussian filter, spline filter, morphological filters, surface texture

Filtr Gaussa jest obecnie najlepiej opisany, względnie łatwy pod względem obliczeń i interpretacji oraz wykorzystywany we wszystkich przyrządach analizujących strukturę geometryczną powierzchni. Odstęp próbkowania w filtracji Gaussa spełnia twierdzenie Nyquista, dlatego nie następuje utrata danych i sygnał wejściowy może zostać zrekonstruowany. Filtracja opisana jest za pomocą funkcji wagi oraz charakterystyki przenoszenia. Filtr Gaussa definiuje się za pomocą długości fali *cut-off*, a oblicza na podstawie transformaty Fouriera. Wybrana wartość *cut-off* decyduje o tym, które składowe profilu lub powierzchni zostaną przeniesione jako chropowatość, a które zablokowane. Jest ona znormalizowana i powiązana z wartościami parametrów chropowatości:  $R_a$ ,  $R_z$  – dla profili i powierzchni losowych,  $S_m$  – dla profili i powierzchni okresowych. Wśród nowych metod filtracji pojawiły się dwie najbardziej zbliżone do standardowego filtra Gaussa:

- odporny filtr regresji Gaussa,
- filtr funkcjami sklejanymi.

Filtry odporne są niewrażliwe na nieciągłości profilu wejściowego w postaci pochylenia, skoku i pików (gwałtownych wzniesień lub wgłębień), co pozytywnie wpływa na ocenę chropowatości profilu lub powierzchni. Funkcja wagi i tym samym charakterystyka przenoszenia są zależne od wartości profilu.

Na filtr funkcjami sklejanymi składają się splajny, będące kombinacją odcinków wielomianów z gładkim dopasowaniem na łączeniach. Stopień filtru funkcjami sklejanymi jest równy najwyższemu stopniowi wszystkich użytych wielomianów. Pomimo dużego podobieństwa do filtra Gaussa – ze względu na charakterystykę przenoszenia (tłumienie 50% wartości *cut-off*) – najczęściej nie jest opisywany za pomocą funkcji wagi. Filtry sklepane oprócz ekstrakcji profilu przefiltrowanego dodatkowo usuwają z niego szum [1, 2].

Filtracja morfologiczna była i jest powszechnie stosowana w przetwarzaniu obrazów, natomiast w dziedzinie metrologii struktury geometrycznej powierzchni stanowi nowość. Filtr morfologiczny jest oparty na otaczaniu zmierzonych danych za pomocą elementu strukturyzującego – najczęściej dysku (profile) i sfery (powierzchnie) o zdefiniowanym promieniu. Na filtrację morfologiczną może się składać od jednej do kilku operacji morfologicznych opartych na sumowaniu Minkowskiego. Cztery podstawowe to: poszerzenie, erozja, otwieranie, zamykanie. Są one podzielone na dwie grupy: operacje podstawowe (poszerzenie i erozja) oraz operacje złożone (otwieranie i zamykanie). Operacje otwierania i zamykania są najmniej złożonymi filtrami morfologicznymi. Aby otrzymać morfologiczny filtr otwierania, konieczne jest wykonanie erozji, a następnie poszerzenia. Filtr otwierania usuwa wzniesienia mniejsze niż średnica elementu strukturyzującego. Wynik znajduje się poniżej danych wejściowych. Aby otrzymać morfologiczny filtr zamykania, konieczne jest wykonanie – odwrotnie niż w przypadku otwierania – poszerzenia, a następnie erozji. Filtr zamykania usuwa wgłębienia mniejsze niż średnica elementu strukturyzującego. Wynik znajduje się powyżej danych wejściowych.

Oprócz dwóch podstawowych filtrów morfologicznych istnieją również bardziej złożone, nazywane naprzemiennymi filtrami morfologicznymi. Są one stosowane wtedy, gdy zachodzi konieczność jednoczesnego wyeliminowania wzniesień i wgłębień mniejszych od elementu

\* Mgr inż. Aneta Łętocha (aneta.letocha@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

strukturyzującego. Normy proponują cztery sekwencje naprzemiennego filtru morfologicznego:

- zamykanie, a następnie otwieranie,
- otwieranie, a następnie zamykanie,
- zamykanie, a następnie otwieranie i ponowne zamykanie,
- otwieranie, a następnie zamykanie i ponowne otwieranie.

Ponieważ filtracja morfologiczna nie spełnia twierdzenia Nyquista, nie jest możliwe znalezienie uniwersalnego, równoodległego próbkowania, które nie powodowałoby utraty danych [3–6].

## Metoda i parametry pomiarów

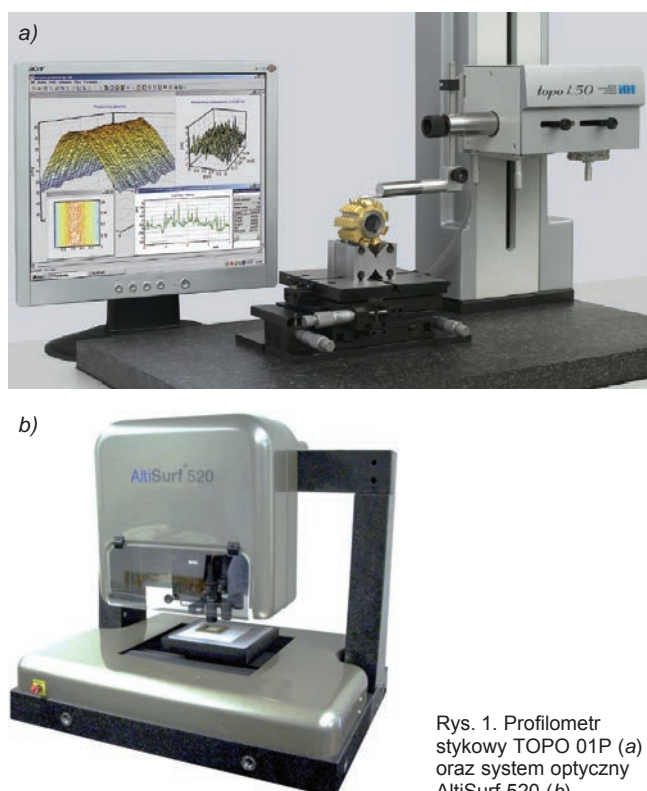
Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem profilometru stykowego TOPO 01P (rys. 1a) oraz metody profilowania konfokalnego dostępnej w systemie optycznym AltiSurf 520 (rys. 1b). Profilometr TOPO 01P wyposażono w indukcyjną głowicę pomiarową z diamentową końcówką w kształcie stożka o promieniu  $2\ \mu\text{m}$  i kącie wierzchołkowym  $90^\circ$ , a system AltiSurf 520 – w czujnik konfokalny o zakresie  $130\ \mu\text{m}$  i rozdzielczości pionowej  $8\ \text{nm}$ .

Przeanalizowano wpływ parametrów nowych metod filtracji na wynikowe parametry chropowatości. W tym celu wykorzystano program AltiMap 6. Obliczono wysokościowe parametry chropowatości powierzchni ( $Sq$ ,  $Sp$ ,  $Sv$ ,  $Sz$ ,  $Sa$ ) oraz profilu ( $Rp$ ,  $Rv$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ,  $Ra$ ).

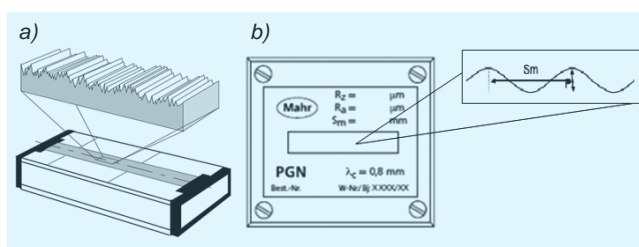
Do badań wybrano dwa kontrolne wzorce chropowatości:

- losowy (typu D) produkcji HALLE, z oznaczonymi parametrami  $Ra = 0,213\ \mu\text{m}$  i  $Rz = 1,671\ \mu\text{m}$  (rys. 2a)
- sinusoidalny (okresowy, typu C) produkcji MAHR, z oznaczonymi parametrami  $Ra = 0,90\ \mu\text{m}$  i  $Rz = 3,12\ \mu\text{m}$  (rys. 2b).

Wykonano pomiary dwóch obszarów o wymiarach  $4 \times 4\ \text{mm}$  (po jednym na wzorec) z prędkością  $0,5\ \text{mm/s}$  oraz gęstością skanowania ( $dX \times dY$ ):  $0,5 \times 10\ \mu\text{m}$ ;



Rys. 1. Profilometr stykowy TOPO 01P (a) oraz system optyczny AltiSurf 520 (b)



Rys. 2. Wzorce chropowatości: a) typu D, b) typu C

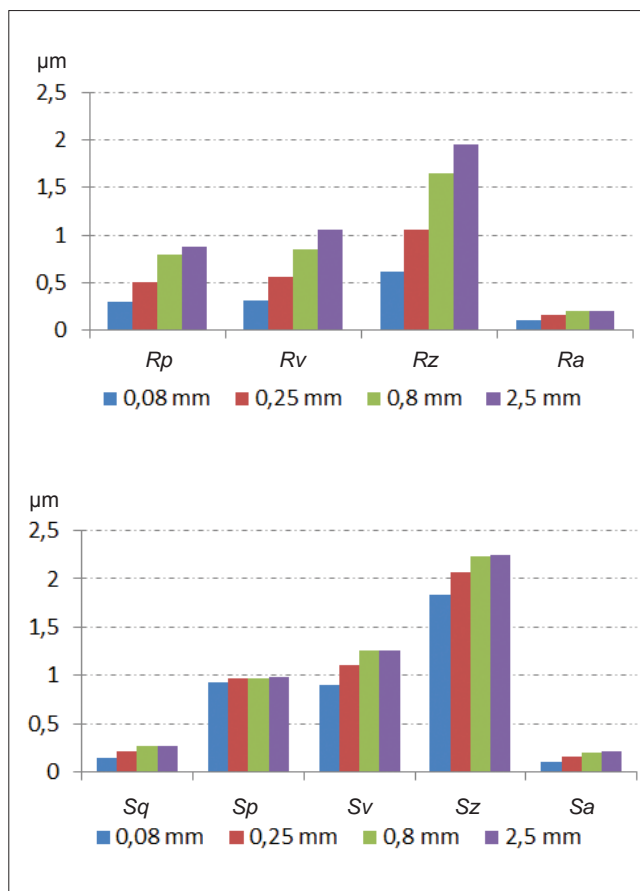
$0,5 \times 5\ \mu\text{m}$  i  $1 \times 1\ \mu\text{m}$ . Dodatkowo wykonano serię pomiarów w tym samym miejscu na wybranej powierzchni z zadanym obszarem pomiarowym i gęstością skanowania, aby sprawdzić powtarzalność wyników. Przeprowadzono analizę statystyczną.

## Wyniki

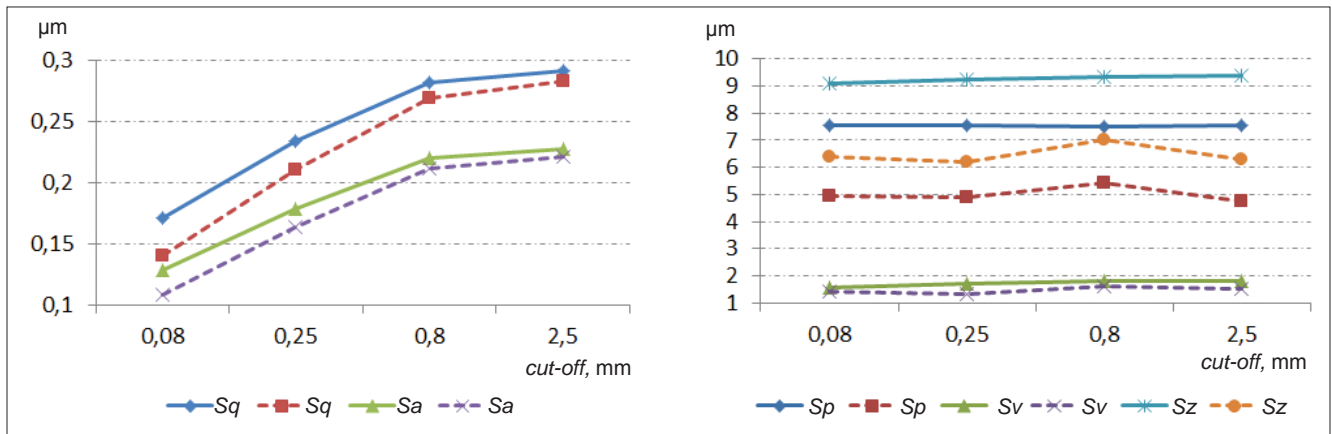
Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane przy zastosowaniu odpornej filtracji Gaussa, na rys. 5–7 – filtracji funkcjami sklejanymi, a na rys. 8–11 – filtracji morfologicznej.

Wykresy na rys. 3 reprezentują wybrane parametry chropowatości dla wzorca typu D, po zastosowaniu odpornego filtra Gaussa z różnymi wartościami *cut-off*.

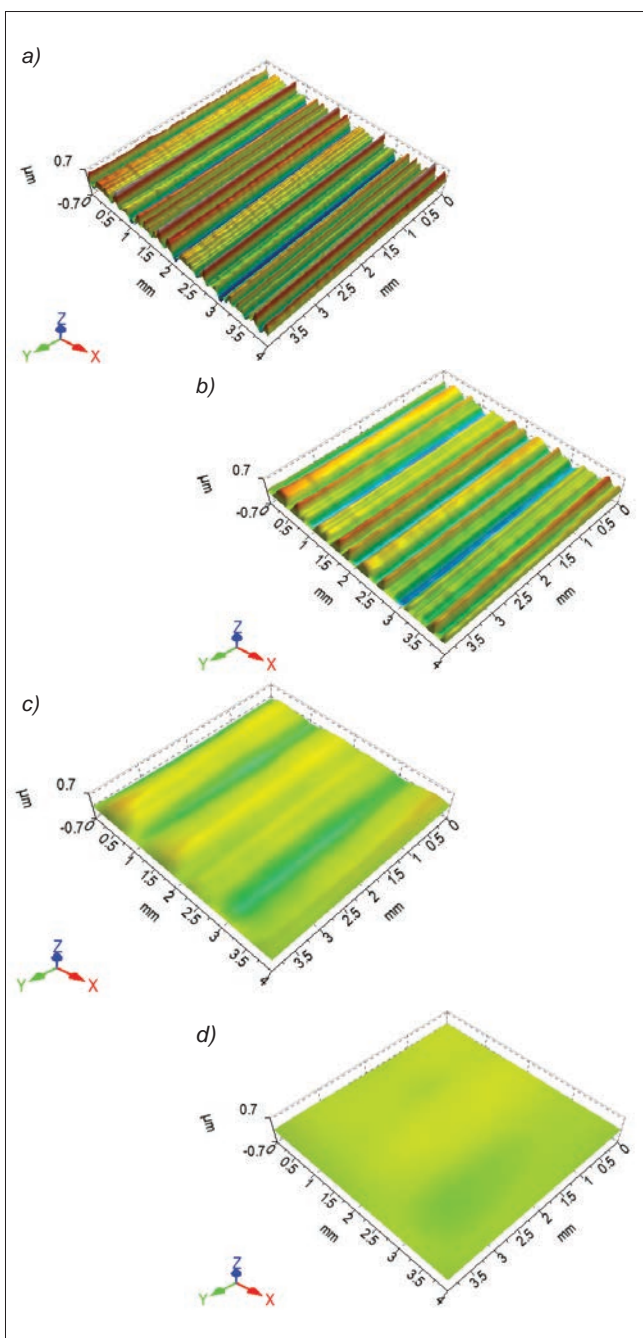
Na rys. 4 zaprezentowano różnice parametrów chropowatości powierzchni, wynikające z zastosowania odpornego lub standardowego filtra Gaussa, uzyskane dla powierzchni wzorca typu D, zawierającej wysoki pik związany z metodą pomiaru (metodą profilowania konfokalnego).



Rys. 3. Wyniki parametrów chropowatości dla wzorca typu D po zastosowaniu odpornego filtra Gaussa z różnymi wartościami *cut-off* (obszar  $4 \times 4\ \text{mm}$ ,  $dX = 0,5\ \mu\text{m}$ ,  $dY = 10\ \mu\text{m}$ , filtracja medianowa)



Rys. 4. Różnice w wynikach parametrów chropowatości powierzchni dla wzorca typu D (obszar  $4 \times 4$  mm,  $dX=0,5 \mu\text{m}$ ,  $dY=10 \mu\text{m}$ , bez filtracji medianowej), uzyskane po zastosowaniu odpornego (linia ciągła) i standardowego (linia przerywana) filtra Gaussa

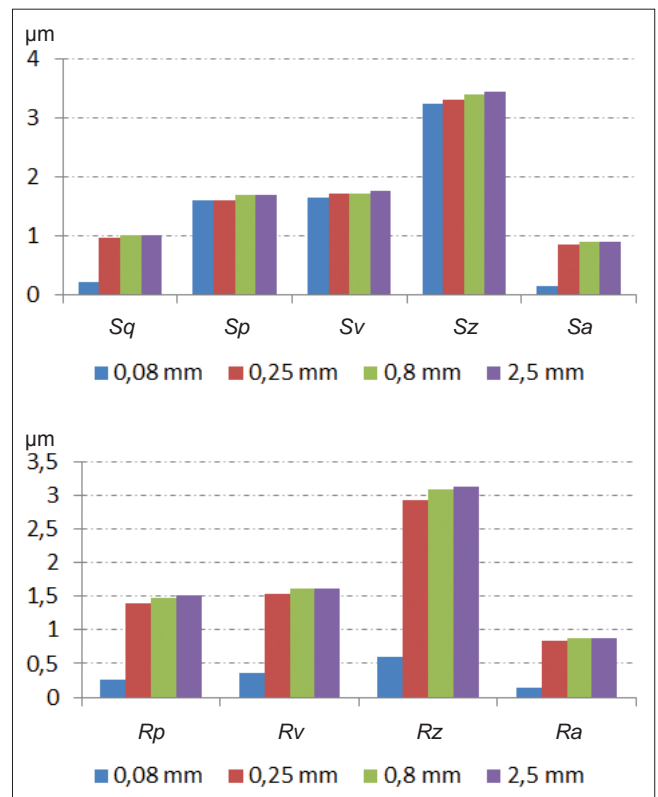


Rys. 5. Wpływ zmiany wartości *cut-off* filtra sklejonego na powierzchnię falistości wzorca typu D: a) *cut-off* = 0,08 mm, b) *cut-off* = 0,25 mm, c) *cut-off* = 0,8 mm, d) *cut-off* = 2,5 mm

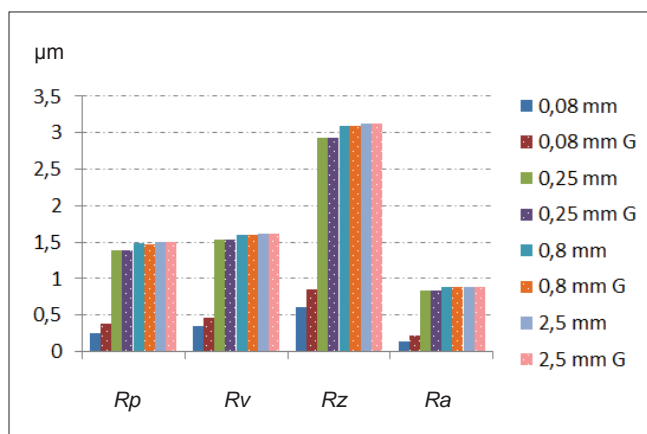
Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wartości *cut-off* parametry chropowatości rosną. Odporny filtr Gaussa nie powoduje zakrzywienia profilu oraz powierzchni falistości dla głębokich wgłębień i wysokich wzniesień, dlatego wartości parametrów chropowatości są znacznie wyższe niż w przypadku filtra standardowego. Odporna filtracja Gaussa sprawdza się wtedy, gdy na badanej powierzchni występują takie elementy, jak wysokie wzniesienia, głębokie wgłębienia czy uskoki powierzchni, które mają być uwzględnione w ocenie chropowatości.

Sposób, w jaki zmienia się powierzchnia falistości wraz ze zmianą wartości *cut-off* filtra funkcjami sklejonymi dla wzorca typu D, pokazano na rys. 5.

Przykładowe parametry chropowatości dla wzorca typu C po zastosowaniu filtra funkcjami sklejonymi z różnymi wartościami *cut-off* przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wyniki parametrów chropowatości dla wzorca typu C po zastosowaniu filtra funkcjami sklejonymi z różnymi wartościami *cut-off* (obszar  $4 \times 4$  mm,  $dX=0,5 \mu\text{m}$ ,  $dY=10 \mu\text{m}$ )



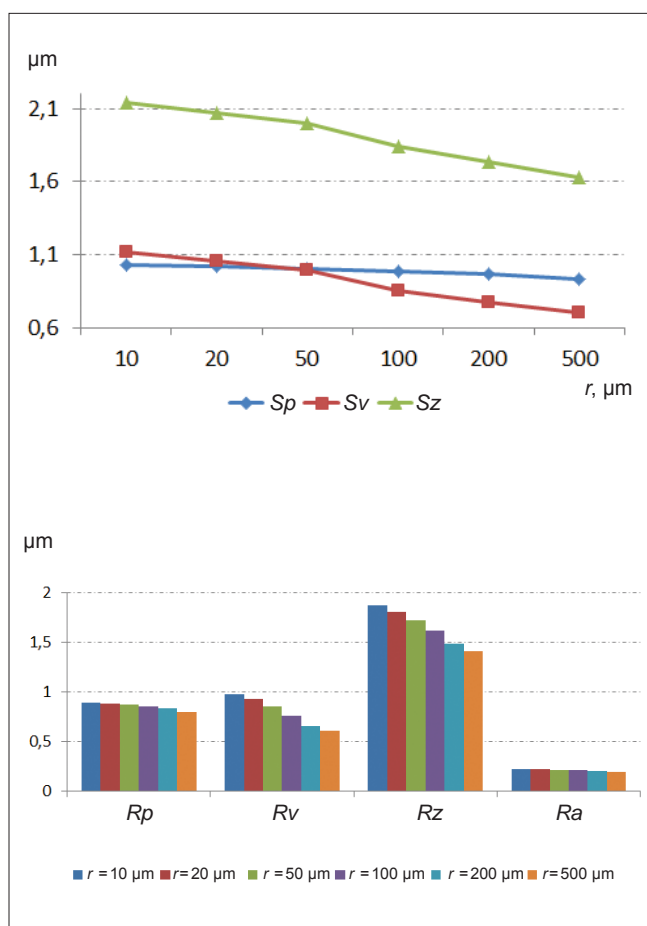
Rys. 7. Różnice parametrów chropowatości profilu uzyskanych dla wzorca typu C (obszar 4 × 4 mm, dX = 0,5 µm, dY = 10 µm) wynikające z zastosowania filtru funkcjami sklejanymi i filtru Gaussa (zakropkowane słupki, oznaczone literą G)

Na rys. 7 zobrazowano różnice w wynikach parametrów chropowatości profilu pomiędzy filtrem funkcjami sklejanymi i standardowym filtrem Gaussa dla powierzchni wzorca typu C. Podobnie jak w przypadku odpornego filtru Gaussa również tu parametry chropowatości rosną wraz ze wzrostem wartości *cut-off*. Profil falistości uzyskany po zastosowaniu filtru funkcjami sklejanymi jest bardziej dopasowany do profilu pierwotnego niż po zastosowaniu standardowego filtru Gaussa. Wartości parametrów chropowatości uzyskane z zastosowaniem filtru funkcja-

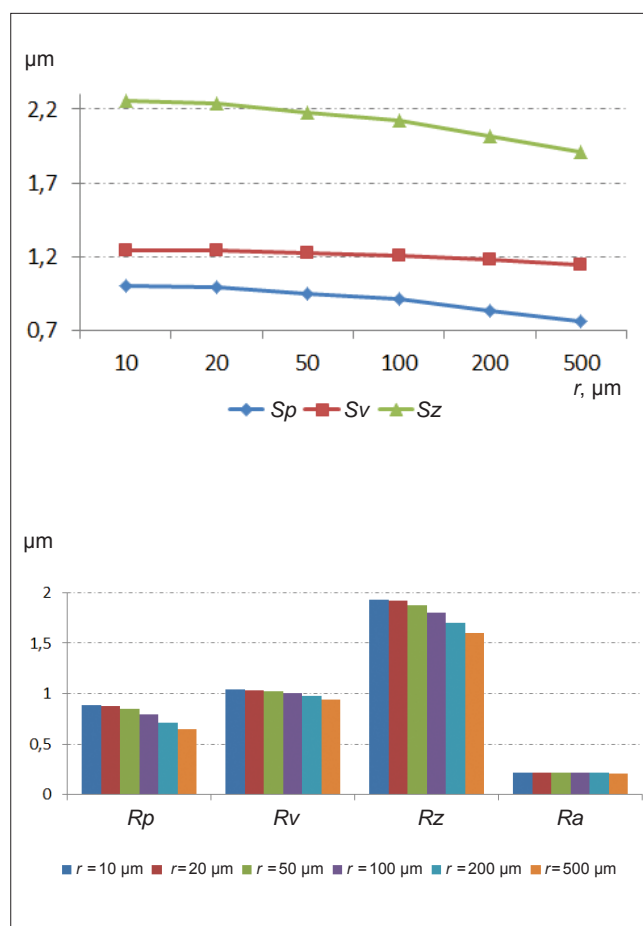
mi sklejanymi są mniejsze lub zbliżone do otrzymanych z użyciem standardowego filtru Gaussa.

Na rys. 8 i 9 przedstawiono odpowiednio wyniki parametrów chropowatości dla wzorca typu D po zastosowaniu filtru morfologicznego zamykania i otwierania z różnymi wartościami promienia, a na rys. 10 – profile chropowatości po zastosowaniu morfologicznego filtru otwierania z różnymi wartościami promienia dysku. Na rys. 11 zawarto przykładowe wyniki parametrów chropowatości dla wzorca typu C po zastosowaniu naprzemiennego filtru morfologicznego (otwieranie–zamykanie) z różnymi wartościami promienia.

Zarówno dla morfologicznego filtru zamykania, jak i naprzemiennego filtru morfologicznego (zamykanie–otwieranie) wraz ze wzrostem promienia filtru maleją wartości parametrów 2D i 3D, zwłaszcza parametry związane z wgłębieniami. Parametry związane ze wzniesieniami niewiele się zmieniają. Jeżeli zmierzona powierzchnia zawiera wysokie i wąskie wzniesienia, to są one dodatkowo podkreślane przez filtr – stają się szersze. Natomiast dla morfologicznego filtru otwierania oraz naprzemiennego filtru morfologicznego (otwieranie–zamykanie) wraz ze wzrostem promienia filtru maleją wartości parametrów 2D i 3D, zwłaszcza parametry związane ze wzniesieniami. Jeżeli zmierzona powierzchnia zawiera głębokie i wąskie wgłębienia, to są one dodatkowo podkreślane przez filtr. Zjawiska te są bardziej widoczne w przypadku analizy wzorca typu D. Dla wzorca typu C zmiany są minimalne do aż momentu, gdy promień filtru jest równy lub większy od oznaczonego odstepu profilu *Sm*.

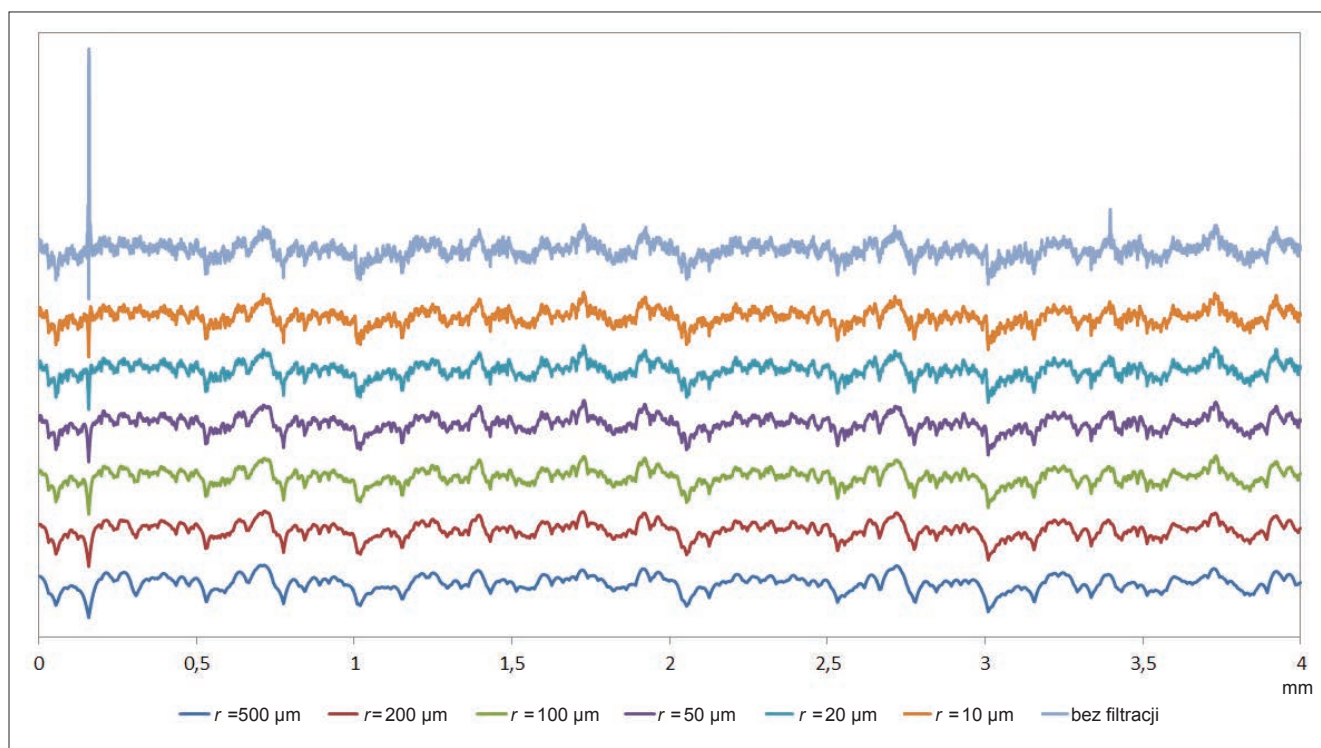


Rys. 8. Wyniki parametrów chropowatości dla wzorca typu D po zastosowaniu filtru morfologicznego zamykania z różnymi wartościami promienia (obszar 4 × 4 mm, dX = 0,5 µm, dY = 10 µm)

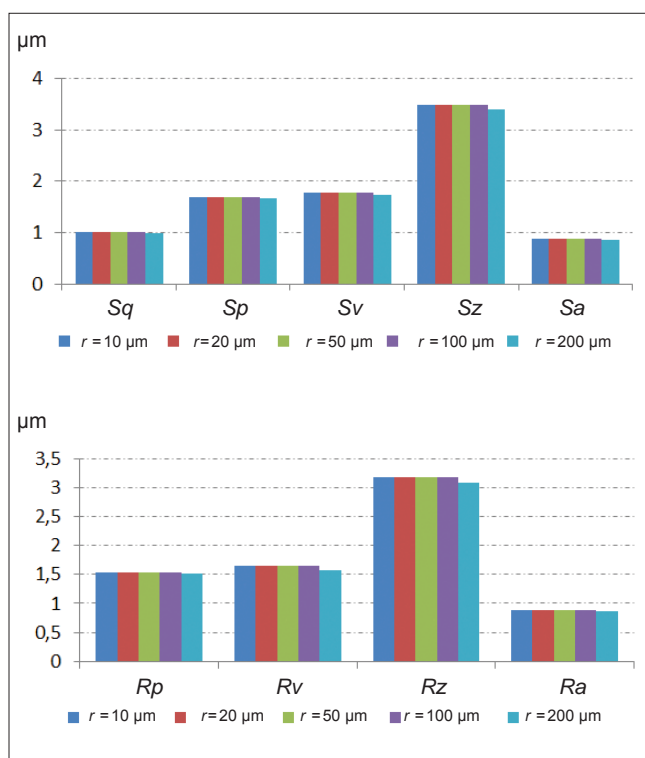


Rys. 9. Wyniki parametrów chropowatości dla wzorca typu D po zastosowaniu filtru morfologicznego otwierania z różnymi wartościami promienia (obszar 4 × 4 mm, dX = 0,5 µm, dY = 10 µm)





Rys. 10. Wyniki filtracji morfologicznej otwierania dla różnych wartości promienia dysku (obszar  $4 \times 4$  mm,  $dX = 0,5 \mu\text{m}$ ,  $dY = 10 \mu\text{m}$ )



Rys. 11. Wyniki parametrów chropowości dla wzorca typu C po zastosowaniu naprzemiennego filtru morfologicznego (otwieranie–zamykanie) z różnymi wartościami promienia (obszar  $4 \times 4$  mm,  $dX = 0,5 \mu\text{m}$ ,  $dY = 10 \mu\text{m}$ )

## Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie nowych metod filtracji w większym stopniu wpłynęło na wyniki parametrów chropowości uzyskane z pomiarów kontrolnego wzorca chropowości typu D w porównaniu z pomiarami wzorca typu C.

Wraz ze wzrostem wartości *cut-off* odpornego filtru Gaussa oraz filtru funkcjami sklejanymi rosną wartości parametrów chropowości. Odporna filtracja Gaussa nie powoduje zakrzywienia profilu i powierzchni dla głębokich wgłębień i wysokich wzniesień. Filtr funkcjami sklejanymi może być użyteczny w przypadku, gdy za pomocą standardowego filtru Gaussa nie można odfiltrować niektórych wgłębień lub wzniesień.

Dla wszystkich typów filtrów morfologicznych wartości parametrów chropowości spadają wraz ze wzrostem promienia filtru. W zależności od tego, jakie elementy składowe profilu chce się odfiltrować – wgłębienia czy wzniesienia – należy używać filtracji zaczynającej się odpowiednio od operacji zamykania lub otwierania.

Najkrótsze czasy obliczeń zanotowano dla filtru funkcjami sklejanymi, a najdłuższe – dla odpornego filtru Gaussa.

## LITERATURA

1. ISO 16610-31. Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 31: Robust profile filters: Gaussian regression filters, 2016.
2. ISO 16610-22. Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 22: Linear profile filters: Spline filters, 2015.
3. Lou S., Jiang X., Scott P.J. "Applications of Morphological Operations in Surface Metrology and Dimensional Metrology". *14<sup>th</sup> International Conference Metrology and Properties of Engineering Surfaces*, Taiwan, 2013.
4. ISO 16610-41. Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 41: Morphological profile filters: Disk and horizontal line-segment filters, 2015.
5. Lou S., Jiang X., Bills P., Scott P. Defining true tribological contact through application of the morphological method to surface topography. *Tribology Letters*. 50, 2 (2013).
6. Łętocha A., Miller T., Gajda K. "Gaussian Filter and Morphological Filter – the differences in filtration parameters selection". *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*. 1, 4 (2014). ■