

# Wpływ rozdzielczości pionowej na błędy pomiaru topografii obrabianych powierzchni

## The effect of vertical resolution on measurement errors of machined surfaces topography

PAWEŁ PAWLUS  
RAFAŁ REIZER  
DOMINIK CZACH\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.11.177>

Przeprowadzono badania wpływu błędu kwantyzacji na wartości parametrów stereometrii powierzchni. Wykonano pomiary struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem profilometru optycznego o rozdzielczości pionowej 0,01 nm. Przedmiotem badań było 20 powierzchni izotropowych i anizotropowych, jedno- i dwuprocesowych, losowych i okresowych. Rozdzielczość pionową zmieniano z zastosowaniem programu TalyMap. Przeanalizowano szczegółowo tendencje zmian parametrów stereometrii trzech powierzchni, wywołane błędami kwantyzacji. Wyodrębniono parametry najbardziej i najmniej wrażliwe na błędy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** topografia powierzchni, rozdzielczość pionowa, błąd kwantyzacji

*The effect of the quantization error on values of surface topography parameters was examined. Surface topography was measured using an optical profilometer of 0.01 nm vertical resolution. Twenty isotropic and anisotropic, one- and two-process, random and deterministic surfaces were objects of investigations. The vertical resolution was changed using TalyMap software. Tendencies of changes of three surfaces due to quantization errors were analyzed in details. Parameters of the highest and the smallest sensitivity on errors were selected.*

**KEYWORDS:** surface topography, vertical resolution, quantization error

We współczesnej technice pomiar struktury geometrycznej powierzchni (SGP) jest bardzo istotny [1]. Szczególne znaczenie mają pomiary stereometrii powierzchni, które są bardzo wrażliwe na błędy [2]. Błędy pomiaru struktury geometrycznej powierzchni można podzielić na: błędy instrumentalne, błędy metody, błędy pomiaru, czynnik ludzki, błędy próbki, błędy środowiskowe i błędy w przetwarzaniu danych [3]. Ocena wiarygodności pomiarów topografii powierzchni jest przedmiotem wielu badań [4–7].

Sposób reprezentacji wartości chwilowych sygnału analogowego przez liczby nazywa się kwantyzacją lub kwantowaniem. Błąd kwantowania jest różnicą między wartością analogową i najbliższym poziomem kwantowania. Rozdzielczość pionowa cyfrowego przyrządu do pomiarów chropowatości powierzchni, czyli najmniejsza wartość, jaką przyrząd może wyświetlić, zależy od zakre-

su pomiarowego i dokładności przetwornika analogowo-cyfrowego. Należy minimalizować niepewność przyrządu i zwiększać rozdzielczość przez dobór najmniejszego z zakresów pomiarowych – jeżeli przyrząd ma więcej niż jeden zakres.

Błędy kwantyzacji najbardziej wpływają na parametry związane z wierzchołkami [8]. Poziomów kwantowania powinno być jak najwięcej – jedynym ograniczeniem są aspekty ekonomiczne. Minimalna liczba poziomów kwantowania powinna wynosić 100. Przy przetworniku ośmiobitowym dla sygnału o normalnym rozkładzie rzędnych wystąpi jedynie 50 poziomów kwantowania. Może to doprowadzić do nieuwzględnienia niektórych wierzchołków [9].

Thomas [10] zaleca stosowanie przetworników nie gorszych niż 10- i 12-bitowe. Przy pomiarze gładkich powierzchni, np. po polerowaniu, mogą występować błędy kwantyzacji, nawet jeśli zastosuje się nowoczesne przyrządy laboratoryjne.

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę wpływu rozdzielczości pionowej na błędy pomiaru topografii obrabianych powierzchni.

### Obiekty badań

Wykonano pomiary stereometrii 20 powierzchni z wykorzystaniem interferometru światła białego o rozdzielczości pionowej 0,01 nm. Pole powierzchni mierzonej wynosiło 3,29 mm × 3,29 mm. Powierzchnie płaskie po pomiarach poziomowano, a w przypadku pozostałych zastosowano wielomian drugiego stopnia w celu usunięcia kształtu. Pojedyncze wierzchołki (szpilki) i wgłębienia usunięto, odcinając części wierzchołkową i wgłębienie. Przedmiotem badań były powierzchnie izotropowe i anizotropowe, jedno- i dwuprocesowe, losowe i okresowe.

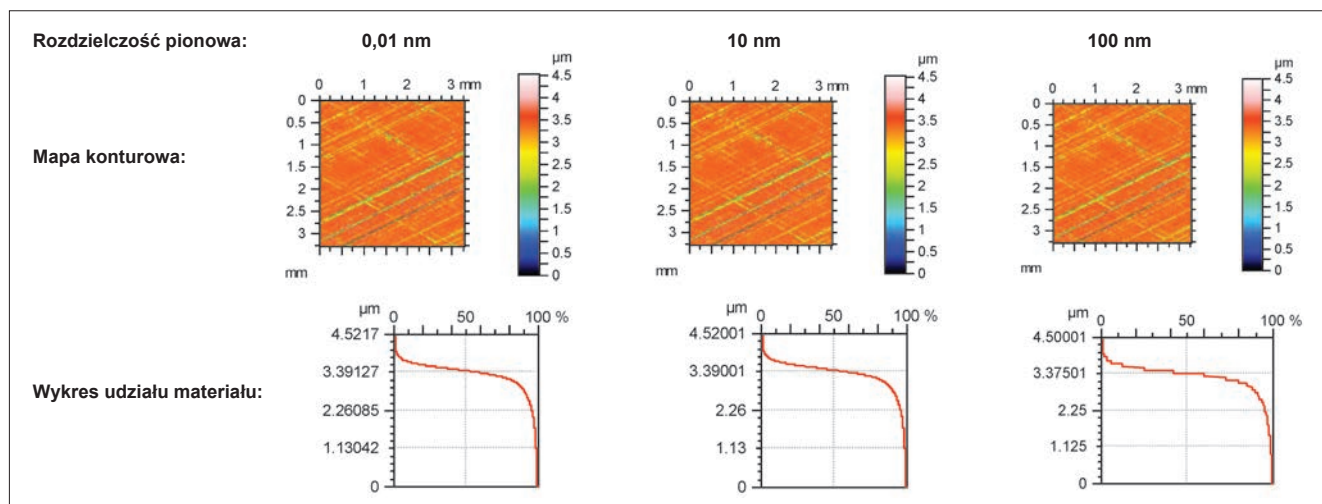
Rozdzielczość pionową zmieniano z zastosowaniem programu TalyMap. Analizowano parametry zawarte w normie ISO 25178 [11].

Bardziej szczegółowej analizie poddano trzy powierzchnie.

### Wyniki badań i ich analiza

Powierzchnia P1 jest powierzchnią cylindra po gładzeniu płaskowierzchołkowym. W tabl. I przedstawiono wartości jej parametrów stereometrii dla różnej rozdzielczości pionowej. Pokazano również błędy względne kwantyzacji. Na rys. 1 zaprezentowano mapy konturowe i wykresy udziału materiału tej powierzchni.

\* Prof. dr hab. Paweł Pawlus (ppawlus@prz.edu.pl), mgr inż. Dominik Czach (d.czach@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska; dr Rafał Reizer (reizer@ur.edu.pl) – Uniwersytet Rzeszowski



Rys. 1. Mapy konturowe i wykresy udziału materiału SGP P1

TABLICA I. Wyniki pomiarów i analizy SGP P1

| Parametr                               | Rozdzielczość pionowa |          | Błąd $\Delta$ , % | Rozdzielczość pionowa |        | Błąd $\Delta$ , % | Rozdzielczość pionowa |  | Błąd $\Delta$ , % |
|--|-----------------------|----------|-------------------|-----------------------|--------|-------------------|-----------------------|--|-------------------|
|  | 0,01 nm               | 1 nm     |                   | 10 nm                 | 100 nm |                   |                       |  |                   |
| <i>Sq</i> , $\mu\text{m}$              | 0,485                 | 0,485    | 0                 | 0,485                 | 0      | 0,484             | -0,21                 |  |                   |
| <i>Ssk</i>                             | -2,84                 | -2,84    | 0                 | -2,84                 | 0      | -2,82             | -0,7                  |  |                   |
| <i>Sku</i>                             | 14,3                  | 14,3     | 0                 | 14,3                  | 0      | 14,2              | -0,7                  |  |                   |
| <i>Sp</i> , $\mu\text{m}$              | 1,17                  | 1,17     | 0                 | 1,17                  | 0      | 1,2               | 2,56                  |  |                   |
| <i>Sv</i> , $\mu\text{m}$              | 3,35                  | 3,35     | 0                 | 3,35                  | 0      | 3,3               | -1,49                 |  |                   |
| <i>Sz</i> , $\mu\text{m}$              | 4,52                  | 4,52     | 0                 | 4,52                  | 0      | 4,5               | -0,44                 |  |                   |
| <i>Sa</i> , $\mu\text{m}$              | 0,3                   | 0,3      | 0                 | 0,3                   | 0      | 0,297             | -1                    |  |                   |
| <i>Smr</i> , %                         | 38,2                  | 38,3     | 0,26              | 39,5                  | 3,4    | 42,2              | 10,47                 |  |                   |
| <i>Smc</i> , $\mu\text{m}$             | 0,377                 | 0,377    | 0                 | 0,379                 | 0,53   | 0,4               | 6,10                  |  |                   |
| <i>Sxp</i> , $\mu\text{m}$             | 1,55                  | 1,55     | 0                 | 1,54                  | -0,65  | 1,5               | -3,23                 |  |                   |
| <i>Sal</i> , mm                        | 0,0165                | 0,0165   | 0                 | 0,0165                | 0      | 0,0165            | 0                     |  |                   |
| <i>Str</i>                             | 0,00904               | 0,00904  | 0                 | 0,00904               | 0      | 0,00902           | -0,22                 |  |                   |
| <i>Std</i>                             | 26                    | 26       | 0                 | 26                    | 0      | 26                | 0                     |  |                   |
| <i>Sdq</i>                             | 0,103                 | 0,103    | 0                 | 0,103                 | 0      | 0,104             | 0,97                  |  |                   |
| <i>Sdr</i> , %                         | 0,522                 | 0,522    | 0                 | 0,522                 | 0      | 0,534             | 2,30                  |  |                   |
| <i>Vmp</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 1,28E-05              | 1,28E-05 | 0                 | 1,25E-05              | -2,34  | 1,02E-05          | -20,31                |  |                   |
| <i>Vmc</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 0,000242              | 0,000242 | 0                 | 0,000241              | -0,41  | 0,000211          | -12,81                |  |                   |
| <i>Vvc</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 0,000277              | 0,000277 | 0                 | 0,000279              | 0,72   | 0,000289          | 4,33                  |  |                   |
| <i>Vvv</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 0,000113              | 0,000113 | 0                 | 0,000114              | 0,88   | 0,000121          | 7,08                  |  |                   |
| <i>Spd</i> , $1/\text{mm}^2$           | 1370                  | 1366     | -0,29             | 1357                  | -0,95  | 1005              | -26,64                |  |                   |
| <i>Spc</i> , $1/\text{mm}$             | 66                    | 66       | 0                 | 66,1                  | 0,15   | 72,7              | 10,15                 |  |                   |
| <i>S10z</i> , $\mu\text{m}$            | 4,01                  | 4,09     | 2                 | 4,01                  | 0      | 4,2               | 4,74                  |  |                   |
| <i>S5p</i> , $\mu\text{m}$             | 1,22                  | 1,22     | 0                 | 1,22                  | 0      | 1,22              | 0                     |  |                   |
| <i>S5v</i> , $\mu\text{m}$             | 2,79                  | 2,87     | 2,87              | 2,79                  | 0      | 2,98              | 6,81                  |  |                   |
| <i>Sda</i> , $\text{mm}^2$             | 0,000749              | 0,000751 | 0,27              | 0,000748              | -0,13  | 0,000877          | 17,09                 |  |                   |
| <i>Sha</i> , $\text{mm}^2$             | 0,000726              | 0,000727 | 0,14              | 0,000723              | -0,41  | 0,000861          | 18,60                 |  |                   |
| <i>Sdv</i> , $\text{mm}^3$             | 2,73E-08              | 2,75E-08 | 0,73              | 2,73E-08              | 0      | 3,34E-08          | 22,34                 |  |                   |
| <i>Shv</i> , $\text{mm}^3$             | 2,22E-08              | 2,23E-08 | 0,45              | 2,21E-08              | -0,45  | 2,77E-08          | 24,77                 |  |                   |
| <i>Sk</i> , $\mu\text{m}$              | 0,579                 | 0,579    | 0                 | 0,57                  | -1,55  | 0,499             | -13,82                |  |                   |
| <i>Spk</i> , $\mu\text{m}$             | 0,25                  | 0,25     | 0                 | 0,259                 | 3,6    | 0,36              | 44,00                 |  |                   |
| <i>Svk</i> , $\mu\text{m}$             | 1,19                  | 1,19     | 0                 | 1,19                  | 0      | 1,05              | -11,76                |  |                   |
| <i>Smr1</i> , %                        | 8,48                  | 8,47     | -0,12             | 9,36                  | 10,38  | 12                | 41,51                 |  |                   |
| <i>Smr2</i> , %                        | 82                    | 82,1     | 0,12              | 83,3                  | 1,59   | 80,5              | -1,83                 |  |                   |

Przy rozdzielczości równej 1 nm błędy względne większości parametrów były niewielkie bądź równe zero.

Przy rozdzielczości pionowej 10 nm, typowej dla profilometrów stykowych, błędy były większe. Największe rozbieżności dotyczyły parametru *Smr1*, który wzrósł o ponad 10% na skutek błędu kwantyzacji. Zwiększyły się również parametry *Smr* (o 3,4%), *Spk* (o 3,6%) i *Smr2* (o 1,59%), natomiast zmniejszyły się parametry *Sk* (o 1,55%) i *Vm* (o 2,34%). Interesująca jest zmiana jedynie parametrów związanych z krzywą udziału materiałowego.

Gdy rozdzielczość pionowa wynosiła 100 nm, zauważono schodkowy charakter krzywej udziału materiału (rys. 1), świadczący o wystąpieniu błędu kwantyzacji. Jedynie ukierunkowanie struktury (parametr *Std*) i parametr *S5p* nie uległy zmianie. Spośród parametrów hybrydo-

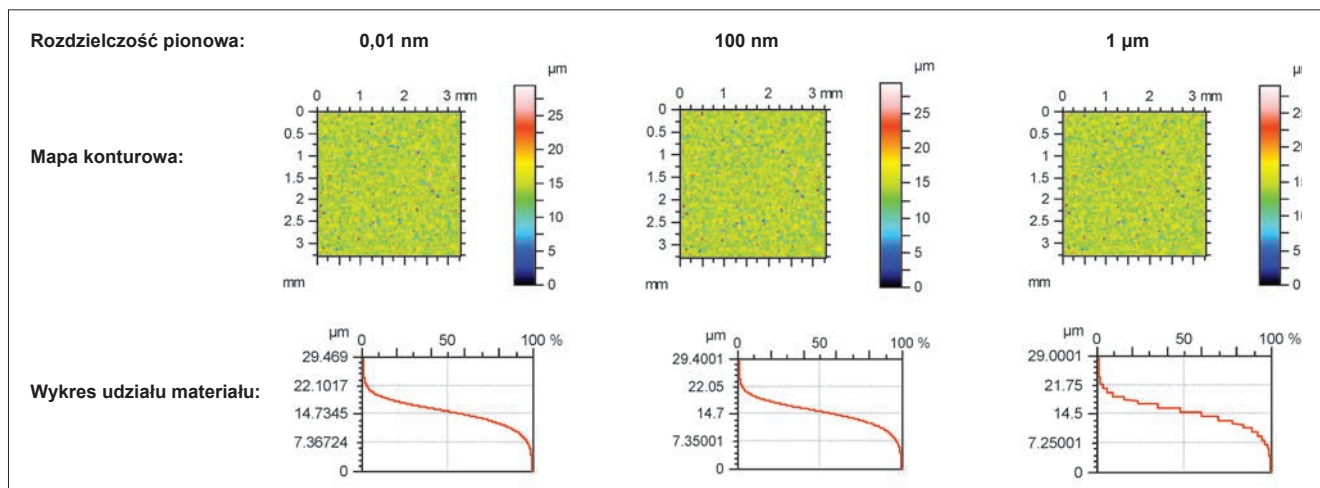
wych względne zmiany pochylenia *Sdq* były mniejsze od błędów rozwinięcia powierzchni *Sdr*. Wartości absolutne błędów względnych następujących parametrów przekroczyły 10%: *Smr*, *Vmp*, *Vmc*, *Spd*, *Spc*. Podobnie było z parametrami cech: *Sda*, *Sha*, *Sdv* i *Shv*. Błędy kwantyzacji parametrów związanych z częścią wierzchołkową powierzchni były większe od błędów parametrów opisujących wgłębienia.

Na rys. 2 i w tabl. II przedstawiono wyniki pomiarów i analizy stereometrii powierzchni P2. Jest to powierzchnia stalowa po obróbce strumieniowo-sciernej, charakteryzująca się stosunkowo dużą wysokością nierówności. Przy rozdzielczości pionowej 10 nm błędy względne określenia parametrów topografii powierzchni są relatywnie małe – nie przekraczają 2%.

Przy rozdzielczości pionowej 100 nm błędy kwantyzacji wzrosły, lecz zazwyczaj nie przekraczały 3%. Wyjątki stanowią: parametr *Spd*, który zmniejszył się o ok. 9%, oraz parametry *Smr* i *Spc*, które zwiększyły się odpowiednio o ok. 6 i 4%. Nie zmieniły się parametry charakteryzujące kształt rozkładu rzędnych *Ssk* i *Sku*, a ponadto *Sv*, *Vvv* i parametry przestrzenne – *Str*, *Sal* i *Std*.

Przy rozdzielczości pionowej 1  $\mu\text{m}$  zmianie uległy wszystkie parametry poza *Sal*. Znaczny wzrost wartości

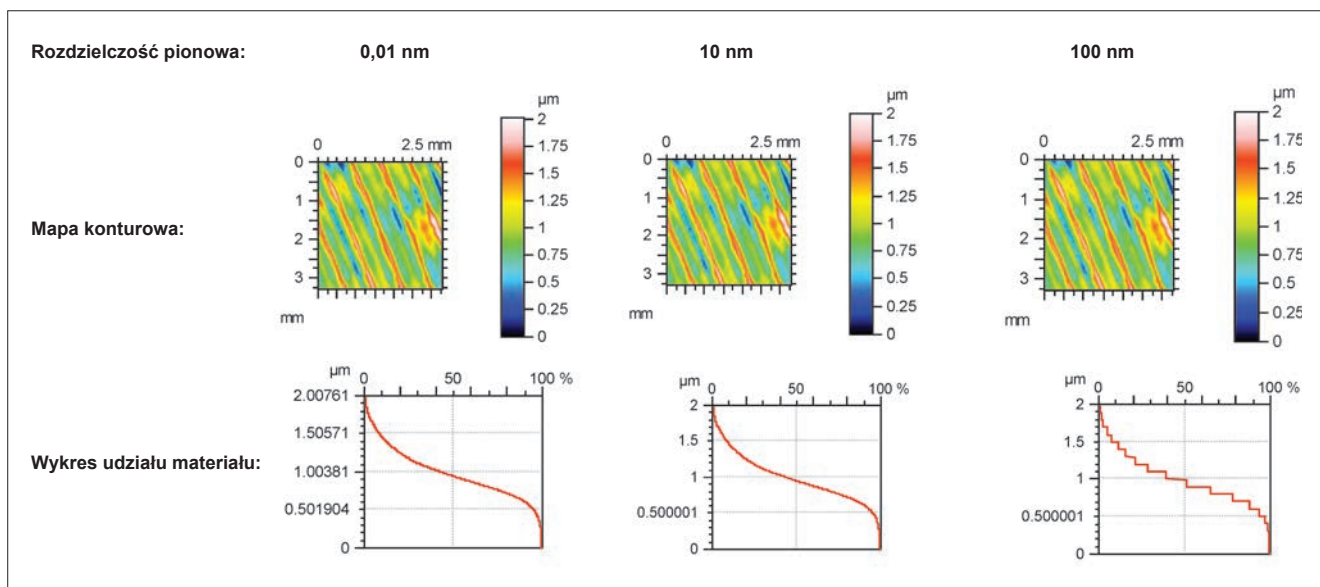
parametru *Std* – o ok. 38% – wynika z izotropowego charakteru powierzchni. Wartości następujących parametrów zwiększyły się o ponad 20%: *Smr*, *Spd*, *Spc*, *Spk* i *Smr1*. Niewielkie zmiany dotyczyły parametrów *Ssk* i *Sku* oraz parametrów przestrzennych *Sal* i *Str*. Generalnie potwierdziły się znaczne zmiany parametrów związanych z wierzchołkami oraz niektórych parametrów związanych w wykresem udziału materiałowego, spowodowane występowaniem błędów kwantyzacji



Rys. 2. Mapy konturowe i wykresy udziału materiału SGP P2

TABLICA II. Wyniki pomiarów i analizy SGP P2

| Rozdzielczość pionowa                  | 0,01 nm  |          | 10 nm |                   | 100 nm |                   | 1 $\mu\text{m}$ |                   |
|--|----------|----------|-------|-------------------|--------|-------------------|-----------------|-------------------|
|  | Parametr |          |       | Błąd $\Delta$ , % |        | Błąd $\Delta$ , % |                 | Błąd $\Delta$ , % |
| <i>Sq</i> , $\mu\text{m}$              | 3,75     | 3,74     | -0,27 | 3,74              | -0,27  | 3,7               | -1,33           |                   |
| <i>Ssk</i>                             | -0,395   | -0,395   | 0     | -0,395            | 0      | -0,392            | -0,76           |                   |
| <i>Sku</i>                             | 3,96     | 3,96     | 0     | 3,96              | 0      | 3,95              | -0,25           |                   |
| <i>Sp</i> , $\mu\text{m}$              | 14,3     | 14,3     | 0     | 14,2              | -0,70  | 14                | -2,1            |                   |
| <i>Sv</i> , $\mu\text{m}$              | 15,2     | 15,2     | 0     | 15,2              | 0      | 15                | -1,32           |                   |
| <i>Sz</i> , $\mu\text{m}$              | 29,5     | 29,5     | 0     | 29,4              | -0,34  | 29                | -1,69           |                   |
| <i>Sa</i> , $\mu\text{m}$              | 2,87     | 2,87     | 0     | 2,86              | -0,35  | 2,81              | -2,09           |                   |
| <i>Smr</i> , %                         | 0,0756   | 0,0751   | -0,66 | 0,0803            | 6,22   | 0,125             | 65,34           |                   |
| <i>Smc</i> , $\mu\text{m}$             | 4,33     | 4,33     | 0     | 4,31              | -0,46  | 4,02              | -7,16           |                   |
| <i>Sxp</i> , $\mu\text{m}$             | 8,63     | 8,62     | -0,12 | 8,59              | -0,46  | 8,02              | -7,07           |                   |
| <i>Sal</i> , mm                        | 0,0218   | 0,0218   | 0     | 0,0218            | 0      | 0,0218            | 0               |                   |
| <i>Str</i>                             | 0,846    | 0,846    | 0     | 0,846             | 0      | 0,847             | 0,12            |                   |
| <i>Std</i>                             | 93,5     | 93,5     | 0     | 93,5              | 0      | 129               | 37,97           |                   |
| <i>Sdq</i>                             | 0,624    | 0,624    | 0     | 0,623             | -0,16  | 0,64              | 2,56            |                   |
| <i>Sdr</i> , %                         | 15,2     | 15,2     | 0     | 15,2              | 0      | 16,1              | 5,92            |                   |
| <i>Vmp</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 1,79E-04 | 1,79E-04 | 0     | 1,81E-04          | 1,12   | 2,01E-04          | 12,29           |                   |
| <i>Vmc</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 0,00317  | 0,00317  | 0     | 0,00316           | -0,32  | 0,00328           | 3,47            |                   |
| <i>Vvc</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 0,00398  | 0,00397  | -0,25 | 0,00394           | -1,01  | 0,00372           | -6,53           |                   |
| <i>Vvv</i> , $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ | 0,000537 | 0,000537 | 0     | 0,000537          | 0      | 0,000481          | -10,43          |                   |
| <i>Spd</i> , $1/\text{mm}^2$           | 500      | 495      | -1    | 453               | -9     | 203               | -59,4           |                   |
| <i>Spc</i> , $1/\text{mm}$             | 239      | 240      | 0,42  | 249               | 4,18   | 344               | 43,93           |                   |
| <i>S10z</i> , $\mu\text{m}$            | 26,8     | 26,7     | -0,37 | 26,6              | -0,75  | 25,8              | -3,73           |                   |
| <i>S5p</i> , $\mu\text{m}$             | 11,8     | 11,8     | 0     | 11,7              | -0,85  | 11,4              | -3,39           |                   |
| <i>S5v</i> , $\mu\text{m}$             | 15       | 15       | 0     | 14,9              | -0,67  | 14,4              | -4              |                   |
| <i>Sda</i> , $\text{mm}^2$             | 0,00164  | 0,00164  | 0     | 0,00163           | -0,61  | 0,00177           | 7,93            |                   |
| <i>Sha</i> , $\text{mm}^2$             | 0,00197  | 0,00198  | 0,51  | 0,00196           | -0,51  | 0,00218           | 10,66           |                   |
| <i>Sdv</i> , $\text{mm}^3$             | 8,01E-07 | 8,01E-07 | 0     | 7,87E-07          | -1,75  | 9,03E-07          | 12,73           |                   |
| <i>Shv</i> , $\text{mm}^3$             | 6,29E-07 | 6,30E-07 | 0,16  | 6,12E-07          | -2,7   | 7,16E-07          | 13,83           |                   |
| <i>Sk</i> , $\mu\text{m}$              | 8,49     | 8,48     | -0,12 | 8,5               | 0,12   | 7,02              | -17,31          |                   |
| <i>Spk</i> , $\mu\text{m}$             | 3,48     | 3,48     | 0     | 3,52              | 1,15   | 4,65              | 33,62           |                   |
| <i>Svk</i> , $\mu\text{m}$             | 5,16     | 5,16     | 0     | 5,06              | -1,94  | 4,22              | -18,22          |                   |
| <i>Smr1</i> , %                        | 9,06     | 9,06     | 0     | 8,87              | -2,1   | 14,8              | 63,36           |                   |
| <i>Smr2</i> , %                        | 88,6     | 86,6     | -2,26 | 86,5              | -2,37  | 84,5              | -4,63           |                   |



Rys. 3. Mapy konturowe i wykresy udziału materiału SGP P3

Ostatnią analizowaną powierzchnią była powierzchnia P3 po frezowaniu (rys. 3).

Gdy rozdzielczość pionowa wynosiła 10 nm, występowały błędy kwantyzacji, lecz nie dotyczyły parametrów  $S_{sk}$ ,  $S_{ku}$  i  $S_v$  oraz parametrów przestrzennych  $S_{al}$ ,  $S_{tr}$  i  $S_{td}$ . Wartości absolutne błędów względnych nie przekraczały 5%, z wyjątkiem parametrów cech  $S_{da}$ ,  $S_{sha}$ ,  $S_{dsv}$  i  $S_{shv}$ .

Gdy rozdzielczość względna wynosiła 100 nm, nie zmieniło się jedynie ukierunkowanie struktury, co jest charakterystyczne dla powierzchni anizotropowych. Wartości następujących parametrów zmieniły się o ponad 20% na skutek błędów kwantyzacji:  $S_{mr}$ ,  $S_{dr}$ ,  $S_{pd}$ ,  $S_{da}$ ,  $S_{sha}$ ,  $S_{dsv}$ ,  $S_{shv}$  oraz  $S_{pk}$  i  $S_{vk}$ . Nieznacznie zmieniły się parametry amplitudowe oraz przestrzenne.

Na podstawie analiz błędów kwantyzacji innych powierzchni potwierdzono, że schodkowy charakter krzywej udziału materiału świadczy o istnieniu błędów kwantyzacji. Zwłaszcza parametr  $S_{mr}$  jest wrażliwy na ten błąd, natomiast nie zależy od rozdzielczości pionowej. Błąd kwantyzacji wywołuje znaczne zmiany parametrów związanych z wierzchołkami – gęstość szczytów zazwyczaj maleje, a ich krzywizna – rośnie. Parametry pionowe nie ulegają istotnym zmianom (do 10%).

Otrzymane na podstawie wykresu udziału materiałowego parametry z grupy  $S_k$  są bardziej wrażliwe na błędy kwantyzacji niż parametry z rodziny  $V$ .

Parametry hybrydowe rosną na skutek błędów kwantyzacji, przy czym parametr  $S_{dq}$  jest bardziej stały w porównaniu z  $S_{dr}$ . Z kolei błąd kwantyzacji ma niewielki wpływ na wartości parametrów przestrzennych. W odniesieniu do powierzchni dwuprosocowych parametry charakteryzujące część wierzchołkową są bardziej wrażliwe na występowanie błędów kwantyzacji niż parametry opisujące część dolin. Parametry cech  $S_{da}$ ,  $S_{sha}$ ,  $S_{dsv}$  i  $S_{shv}$  zmieniają się znacząco na skutek błędów kwantyzacji i nie powinny być stosowane w rutynowych pomiarach powierzchni. Ukierunkowanie struktury nie zmienia się w przypadku powierzchni anizotropowych.

## Wnioski

Schodkowy charakter wykresu udziału materiału świadczy o występowaniu błędów kwantyzacji, który wywołuje

znaczne zmiany gęstości wierzchołków. Parametr  $S_{mr}$  jest wrażliwy na błędy kwantyzacji. Również parametry cech –  $S_{da}$ ,  $S_{sha}$ ,  $S_{dsv}$  i  $S_{shv}$  – wyraźnie się zmieniają na skutek tych błędów, podobnie jak wyróżniki otrzymane na podstawie wykresu udziału materiałowego, zwłaszcza z grupy  $S_k$ .

Błąd kwantyzacji ma niewielki wpływ na wartości parametrów przestrzennych. Parametry pionowe nie ulegają istotnym zmianom.

Parametry charakteryzujące część wierzchołkową powierzchni dwuprosocowych są bardziej wrażliwe na błąd kwantyzacji w porównaniu z parametrami opisującymi część dolin.

## LITERATURA

- Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: WNT, 2008.
- Pawlus P., Mathia T., Wieczorowski M. „The errors of stylus method in surface topography measurements”. Szczecin: ZAPOL, 2014.
- Miller T. „Źródła wiarygodności pomiarów topografii powierzchni”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1722–1723.
- Wieczorowski M., Gapiński B., Grochalski K., Miller T. „Teoretyczne aspekty analizy wybranych źródeł błędów w profilowych pomiarach nierówności powierzchni”. *Mechanik*. 4 (2017): s. 325–327.
- Adamczak S., Świdorski J., Dobrowolski T. „Wybrane zagadnienia stykowych pomiarów struktury geometrycznej powierzchni”. *Mechanik*. 4 (2017): s. 328–331.
- 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 Science – Technical Science*. 65, 1 (2017): s. 53–61.
- Świdorski J., Dobrowolski T. „Zasady dobrej praktyki dla pomiarów chropowatości po bardzo dokładnym toceniu”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1140–1141.
- Pawlus P. „Topografia powierzchni. Pomiar, analiza, oddziaływanie”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005.
- Whitehouse D.J. „The digital measurement of peak parameters on surface profiles”. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 20, 4 (1978): s. 221–227.
- Thomas T.R. „Rough Surfaces. Second Edition”. London: Imperial College Press, 1999.
- Leach R. (red.). „Characterisation on areal surface texture”. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. „Problem of non-measuring points in surface texture measurements”. *Metrology and Measuring Systems*. 24 (2017): s. 525–536. ■