

**Wojciech KACALAK, Katarzyna TANDECKA**  
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA MECHANIKI PRECYZYJNEJ  
ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin

## Metrologiczne aspekty oceny topografii diamentowych folii ściernych do precyzyjnego mikrowygładzania

Prof. dr hab. inż. Wojciech KACALAK

Autor kieruje Katedrą Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Specjalizuje się w technologii maszyn, diagnostyce, optymalizacji i automatyzacji procesów technologicznych, budowie i eksploatacji precyzyjnych urządzeń technologicznych, mikro i nanoinżynierii oraz zastosowaniach sztucznej inteligencji. Jest vice przewodniczącym Komitetu Budowy Maszyn PAN.



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

Mgr inż. Katarzyna TANDECKA

Od roku 2006 doktorantka, a od roku 2011 pracownik na stanowisku Samodzielny referent inżyniersko-techniczny w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się procesami mikrowygładzania z zastosowaniem folii ściernych o nieciągłej powierzchni oraz rolek dociskowych o strefowo zmiennej podatności.



e-mail: katarzyna.tandecka@tu.koszalin.pl

### Streszczenie

Jednym z ważnych zadań, dotyczących prognozowania cech stereometrycznych powierzchni, po wygładzaniu foliami ściernymi, jest wyznaczenie parametrów charakteryzujących powierzchnię czynną. W publikacji opisano metodykę oraz wyniki badań dotyczących cech stereometrycznych powierzchni na przykładzie diamentowych folii ściernych z ziarnami o nominalnej wielkości pół mikrometra. Narzędzia te stosowane są w różnych zabiegach precyzyjnego wygładzania powierzchni o bardzo wysokiej gładkości i dokładności. Przedstawiono wyniki analizy rozmieszczenia wierzchołków w płaszczyźnie równoległej do powierzchni folii oraz w kierunku do niej prostopadłym. Badając ukształtowanie wierzchołków ziaren i przestrzenie między nimi, można wnioskować o potencjał obróbkowym folii ściernych.

**Słowa kluczowe:** folia ścierna, ziarno ścierne, komórka Voronoi, IDLF.

### Metrological aspects of evaluation of diamond abrasive film topography for precise microfinishing

#### Abstract

One of important tasks related to prognosis of the surface stereometry after microfinishing with abrasive films is delimitation of parameters characterising the active surface. The methodology and investigation results concerned the features of stereometric surfaces on an example of diamond abrasive foils with half-micrometer nominal grain size are described in the paper. These tools are applied to different treatments of microfinishing the surface of very high smoothness and precision. The Nanosurf microscope *Atomic Force Microscopy* AFM of *Mobile S* type was applied to investigations of tools of very small grains. There were obtained the topography images of the abrasive film surface of 0.5 micrometer nominal grain size (Fig. 1). In next analyses there were presented the surfaces of grains, formed islands, (Fig. 3) on which there was marked the elevation top and projection on the plane Oxy of the sections binding the grain tops. Using the decomposition of the surface into Voronoi cells, the grains tops were determined with the closest neighbours method. Beginning from the highest top, investigations of abrasive grains and their tops were conducted on various depths  $h$ . On the basis of the performed investigations (Figs. 2 and 3), the surface area of the Voronoi cells was determined (Fig. 4) as decomposition of the surface into areas with the central point of the coordinates  $x, y$  marking the position of the grain top  $z(x, y)$ . The results of analysis of the top sizes in the plane parallel to the film surface and in the orthogonal direction are given. From studying the form of the grain tops and spaces between them one can conclude about the processing potential of abrasive films.

**Keywords:** abrasive film, grain, Voronoi cell, IDLF.

### 1. Wstęp

Mikrowygładzanie z wykorzystaniem folii ściernych różni się od innych metod obróbki. Jest to obróbka powierzchniowa wykończeniowa, która odbywa się poprzez powolne przewijanie taśmy ścierniej i nadanie jej ruchu oscylacyjnego oraz dociskanie taśmy,

do powierzchni obrabianej, przemieszczającej się z prędkością znacznie większą, od prędkości przesuwu taśmy [1]. Cechą charakterystyczną procesu jest jednokrotne wykorzystanie narzędzia, co powoduje potrzebę optymalnego doboru parametrów obróbki. Podstawowym celem procesu obróbki jest zapewnienie wytworzonym elementom wymaganych cech eksploatacyjnych, zgodnie z ich przeznaczeniem użytkowym [2].

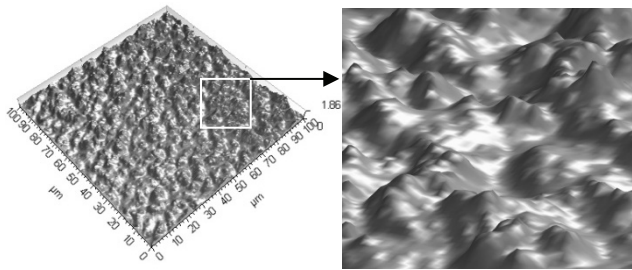
Producenci foliowych taśm ściernych udostępniają niekompletne opisy cech stereometrycznych własnych produktów, co powoduje potrzebę badań między innymi topografii powierzchni folii ściernych w celu doboru najkorzystniejszych parametrów wygładzania.

Jednokrotne wykorzystywanie powierzchni czynnej folii oznacza, iż ziarna aktywne przez pewien czas, zależny od prędkości przesuwu folii, pozostają w strefie obróbki i ponownie już nie biorą udziału w kształtowaniu obrabianej powierzchni [3]. Należy zwrócić uwagę, iż nie wszystkie ziarna ścierne na powierzchni biorą udział w kształtowaniu obrabianego przedmiotu, choć udział ziaren aktywnych jest większy, niż w przypadku obróbki z użyciem narzędzi o małej podatności.

Celem pracy jest określenie wniosków, dotyczących zwiększenia aktywności ziaren ściernych, poprzez modyfikacje cech folii ściernych i właściwości układów docisku taśmy do obrabianej powierzchni. Określenie prawdopodobieństwa kontaktu wierzchołków ziaren folii i obrabianej powierzchni jest ważne dla wyznaczenia potencjału obróbkowego folii i doboru prędkości jej posuwu. Kolejnymi istotnymi cechami narzędzia, są parametry charakteryzujące objętości i ukształtowanie otoczenia ziaren, ponieważ decydują one w głównej mierze o gromadzeniu się produktów procesu wygładzania oraz ich wynoszenia ze strefy obróbkowej.

### 2. Ocena topografii powierzchni folii ścierniej typu IDLF 0,5 $\mu\text{m}$

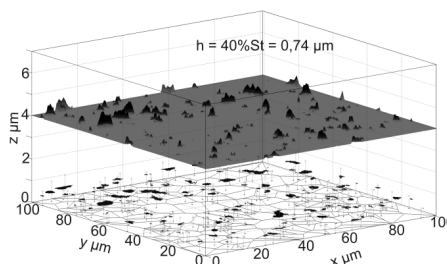
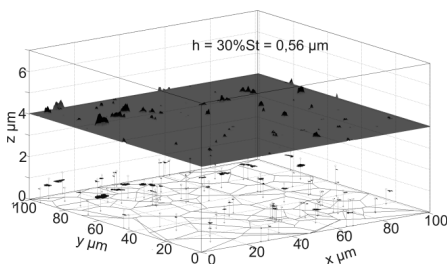
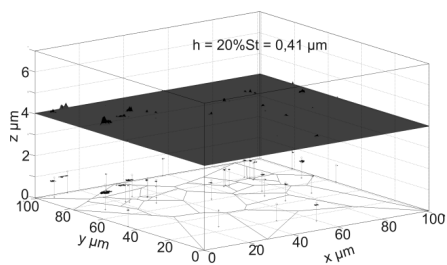
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań folii ściernych typu IDLF (*ang. Imperial Diamond Lapping Film*) firmy 3M o wymiarze nominalnym ziaren 0,5 mikrometra. Folie ścierne typu IDLF wykorzystywane są do obróbki ceramiki, węglików spiekanych i innych materiałów. Cechą charakterystyczną takich narzędzi jest całkowite zatopienie ziaren diamentowych w cienkiej warstwie spoiwa oraz ich agregowanie. Poprzez „zatopienie” ziaren diamentowych w kleju pomiary topografii powierzchni narzędzia są znacznie utrudnione, szczególnie z zastosowaniem metod optycznych. Do badań narzędzi o bardzo małych ziarnach zastosowano mikroskop sił atomowych AFM (*ang. Atomic Force Microscopy*) typu *Mobile S* firmy *Nanosurf*. Dzięki wykorzystaniu mikroskopu AFM, możliwa była akwizycja danych reprezentujących obrazy i mapy przestrzenne powierzchni folii ściernych o nominalnej wielkości ziarna 0,5 mikrometra (rys. 1). Cechą charakterystyczną badanych folii, jest gromadzenie się ziaren w tzw. agregaty.



Rys. 1. Mapa przestrzenna powierzchni folii IDLF o nominalnej wielkości ziarna diamentowego 0,5 mikrometra

Fig. 1. IDLF film surface of the 0.5 micrometer nominal diamond grain size

Opracowano aplikację do oceny nowych parametrów opisanych poniżej, w której przeprowadzono analizy cech wyniesień ponad płaszczyznę na różnych poziomach, od 20% wartości parametru St [4] do 40% jego wartości od najwyższego wierzchołka powierzchni. Wyznaczono wyniesienia nad płaszczyznę (rys. 2, rys. 3), obliczono parametry wysp, czyli podstaw wyniesień nad płaszczyznę Oxy. Grupy wykresów (rys. 2), reprezentują powierzchnie wyniesień oraz powstałych wysp, na których zaznaczono najwyższy punkt wyniesienia oraz zrzutowano komórki Voronoi na płaszczyznę Oxy. Elementem centralnym komórek Voronoi są najwyższe wierzchołki wyniesień. Operację badania wyniesień przeprowadzono na różnych głębokościach  $h$  rozpoczynając od najwyższego wierzchołka.

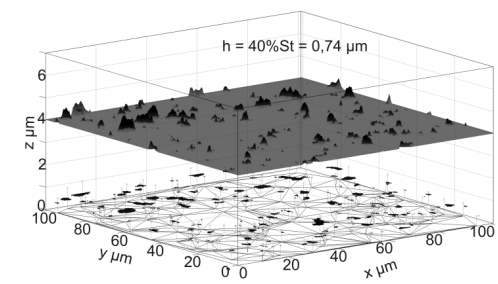
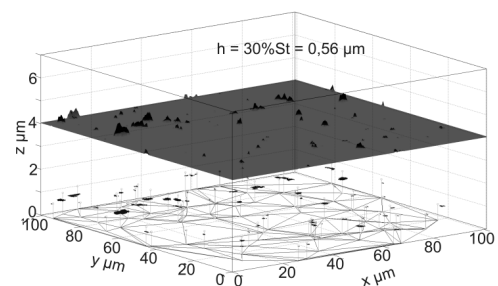
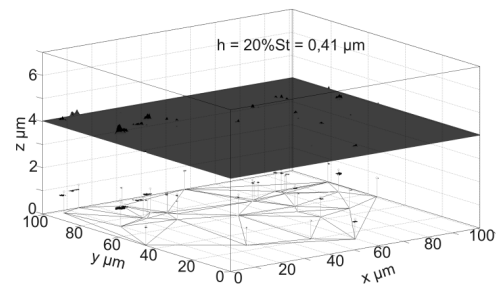


Rys. 2. Pola przecięcia powierzchni folii ścierniej typu IDLF oraz rzut na płaszczyznę Oxy komórek Voronoi, których punktami centralnymi są wierzchołki wyniesień nad płaszczyznę, odległą od najwyższego wierzchołka o wartość  $h$

Fig. 2. Field of IDLF film surface slit and projection on the plane Oxy of Voronoi cells whose tops are central points over the plane of  $h$  distance from the highest top

W kolejnych analizach (rys. 3) zaprezentowano powierzchnie wyniesień, powstałe wyspy na których zaznaczono wierzchołek wyniesienia oraz zrzutowano na płaszczyznę Oxy odcinki łączące wierzchołki wyniesień, wyznaczone metodą najbliższych sąsiadów, wykorzystując dekompozycję powierzchni na komórki Voronoi. Operację badania wyniesień i ich wierzchołków przeprowadzono na różnych głębokościach  $h$  rozpoczynając od najwyższego wierzchołka.

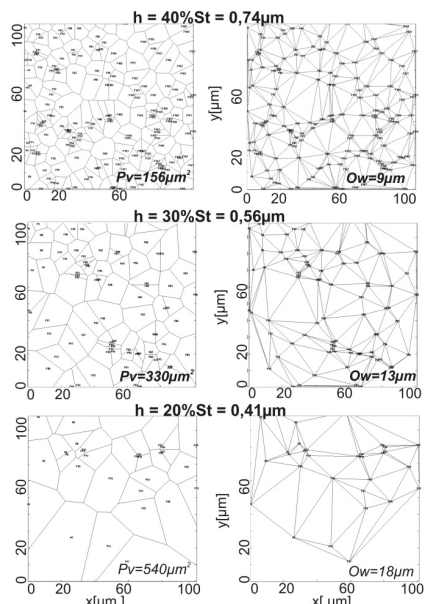
Na podstawie przeprowadzonych badań (rys. 2, rys. 3) wyznaczono pola powierzchni komórek Voronoi (rys. 4) jako dekompozycję powierzchni na podobszary z punktem centralnym o współrzędnych  $x, y$  wyznaczających położenie wierzchołka wyniesienia  $z(x, y)$ .



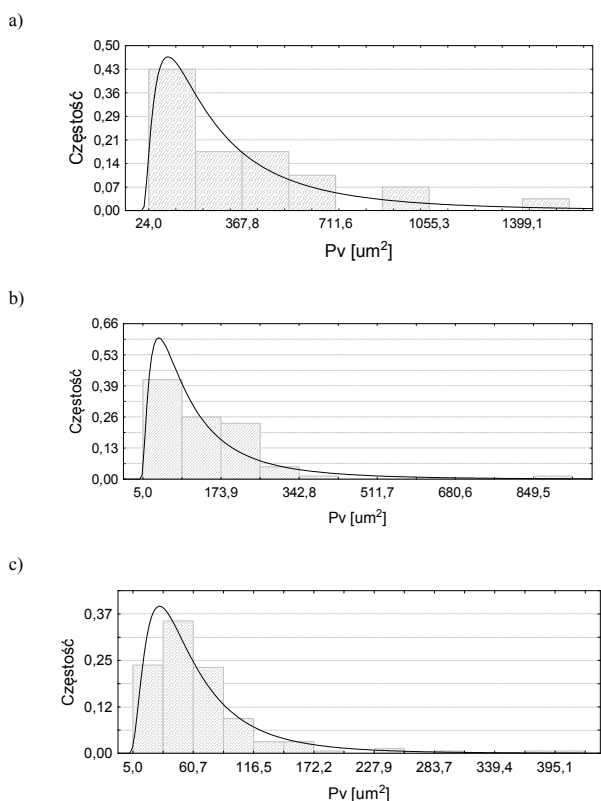
Rys. 3. Pola przecięcia analizowanej powierzchni folii ścierniej typu IDLF oraz rzut na płaszczyznę Oxy odcinków łączących najwyższe wierzchołki wyniesień ponad płaszczyznę, odległą od najwyższego wierzchołka o wartość  $h$

Fig. 3. Field of film IDLF surface slit and projection on the plane Oxy of sections joining the highest tops above the plane of  $h$  distance from the highest top

Można stwierdzić, iż średnie pole komórek Voronoi maleje, wraz ze wzrostem  $h$ , czyli odległością płaszczyzny wyniesień od najwyższego wierzchołka powierzchni. Obliczono odległości, pomiędzy wierzchołkami wyniesień, będących najbliższymi sąsiadami. Wyznaczenie sąsiedztwa stało się możliwe dzięki dekompozycji powierzchni na komórki Voronoi [5]. Odległości między wierzchołkami maleją wraz ze wzrostem odległości płaszczyzny przecięcia od najwyższego wierzchołka. Dzięki wyznaczonym parametrom (rys. 5), można wnioskować o optymalnym zagłębieniu narzędzia w przedmiot obrabiany w procesie mikrowygładzania oraz o możliwościach gromadzenia, wokół poszczególnych ziaren, produktów obróbki, co wprost wiąże się z potencjałem obróbkowym folii.

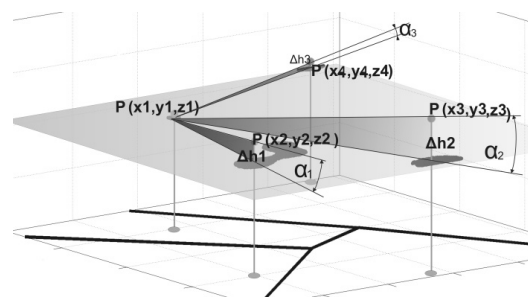


Rys. 4. Dekompozycja powierzchni folii ścierniej typu IDLF z zastosowaniem komórek Voronoi, których punktami centralnymi są wierzchołki wyniesień nad płaszczyznę (lewa strona) oraz rzut na płaszczyznę Oxy odcinków łączących wierzchołki wyniesień nad płaszczyznę (prawa strona) oddległą od najwyższego wierzchołka powierzchni o wartość h  
 Fig. 4. Decomposition of the IDLF abrasive film surface with use of Voronoi cells whose tops are central points over the plane (left side) and projection on the plane Oxy of sections joining tops over the plane distant from the surface highest top by h value (right side)

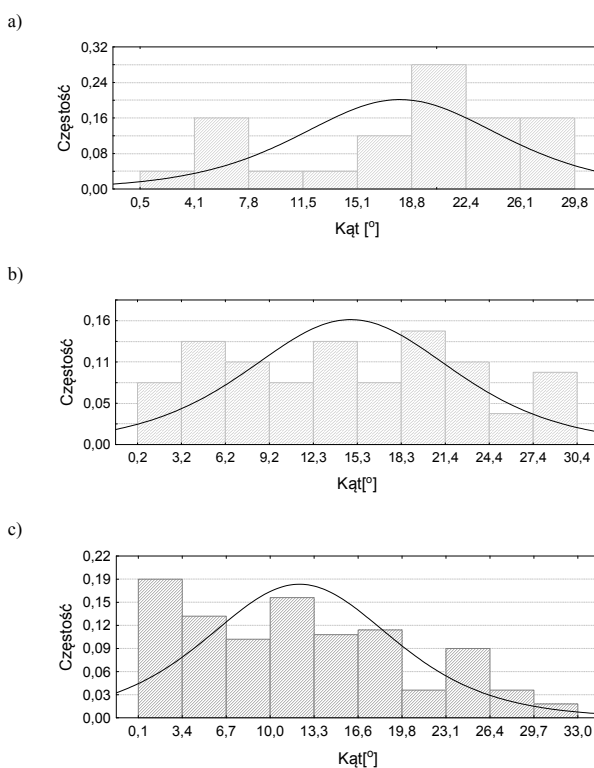


Rys. 5. Histogramy pól powierzchni komórek Voronoi Pv, jako dekompozycji powierzchni folii ścierniej, których punktami centralnymi są wierzchołki wyniesień nad powierzchnię, oddaloną od najwyższego wierzchołka o a) 20%, b) 30%, c) 40% wartości parametru St  
 Fig. 5. Histograms of the surface areas of Voronoi Pv cells as decomposition of the abrasive film surface whose tops are central points over the surface, distant from the highest top by a) 20%, b) 30%, c) 40% value of the parameter St

Opracowano nowy algorytm analizy powierzchni czynnej folii ścierniej w kierunku prostopadłym do kierunku obróbki (rys. 6). Wyznaczano wierzchołki wyniesień o współrzędnych  $z_i(x_i, y_i)$ , wśród wierzchołków wyszukiwano ten najniższy położony jako punkt startowy  $z_1=(x_1, y_1)$ . Następnie wyznaczano różnice w wysokościach delta  $h_i$  w stosunku do pozostałych aktywnych wierzchołków. Ostatecznie obliczono kąty nachylenia  $\alpha_i$  wszystkich wierzchołków do punktu startowego(rys. 7).



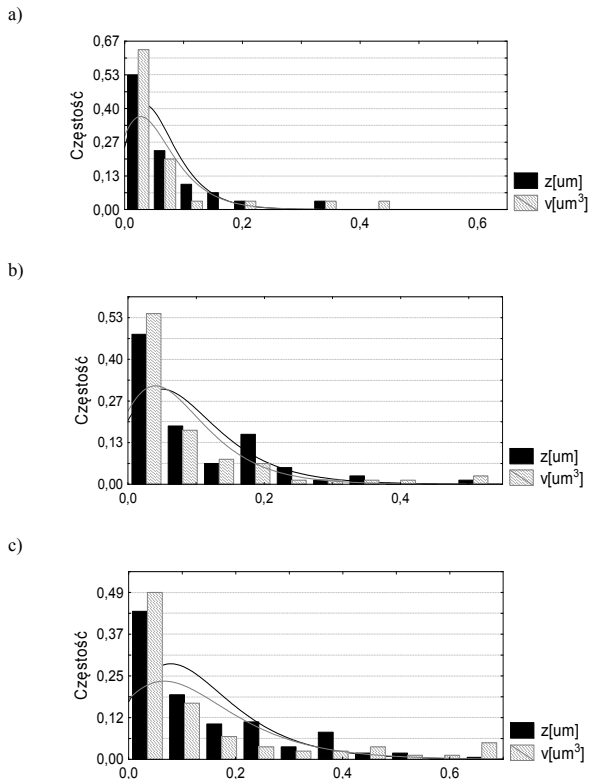
Rys. 6. Schemat do analizy kątów nachylenia odcinków łączących sąsiednie wierzchołki powierzchni  
 Fig. 6. The method for analysis of inclination angles of sections joining the neighbouring tops of the surface



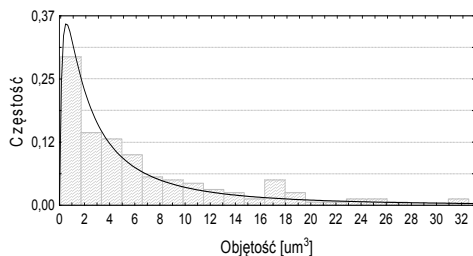
Rys. 7. Histogramy kątów nachylenia odcinków łączących wierzchołki wyniesień nad płaszczyznę oddaloną od najwyższego wierzchołka o a) 20%, b) 30%, c) 40% wartości parametru St  
 Fig. 7. Histograms of inclination angles of the sections joining the tops over the plane distant from the highest top by a) 20%, b) 30%, c) 40% value of the parameter St

O aktywności ziaren ściernych decyduje przede wszystkim ich położenie i ukształtowanie. Zbadano relację wysokości wyniesień i ich objętości oraz przedstawiono analizy na jednym wykresie (rys. 8). Zaobserwowano, że wierzchołki ziaren mają dość dużą smukłość, co może oznaczać większą skuteczność w usuwaniu materiału dla małych zagłębieni w materiał obrabiany (rys. 10a, b). Ocena warunków pracy ziaren po zagłębieniu się narzędzia w materiał obrabiany do 40% wartości parametru St powierzchni

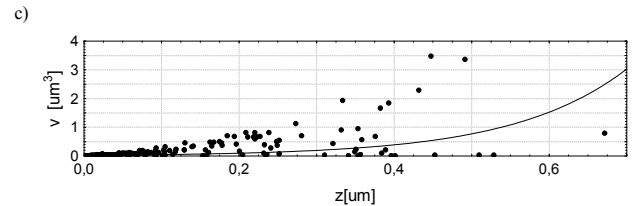
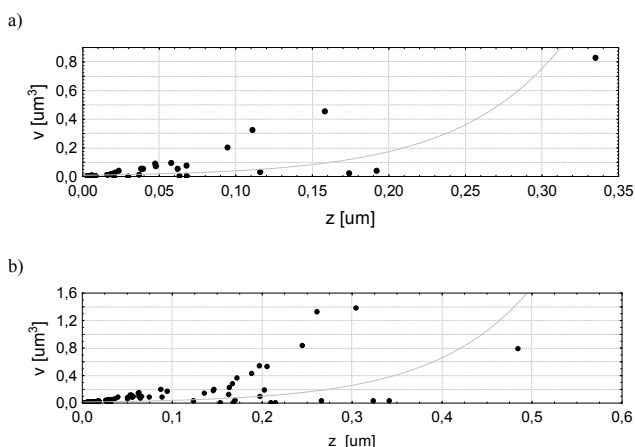
folii (rys. 10c), wskazuje na zwiększającą się objętość wyniesienia w stosunku do wysokości.



Rys. 8. Histogramy objętości i wysokości wyniesień nad płaszczyzną odległą od najwyższego wierzchołka o a) 20%, b) 30%, c) 40% wartości parametru St  
Fig.8. Histograms of the grain volume and the height over the plane distant from the highest top by a) 20%, b) 30%, c) 40% value of the parameter St



Rys. 9. Histogram objętości pomiędzy wyniesieniami nad płaszczyzną odległą od najwyższego wierzchołka o 40% wartości parametru St  
Fig.9. Histogram of the volume among grains over the plane distant from the highest top by 40% value of the parameter St



Rys. 10. Wykresy objętości wyniesień nad płaszczyzną oddaloną od najwyższego wierzchołka o a) 20%, b) 30%, c) 40% wartości parametru St powierzchni folii IDLF 0,5 um w funkcji wysokości wyniesień  
Fig.10. Grain volume on the plane distant from the highest top by a) 20%, b) 30%, c) 40% value of parameter St of the 0.5 um IDLF film surface vs. the grain height

Jednym z najważniejszych parametrów, charakteryzujących cechy foliowej taśmy do mikrowygładzania, jest pojemność przestrzeni między ziarnami [5, 6]. Wynika to z cech sposobu obróbki i charakteru pracy ziarna ściernego podczas mikrowygładzania, gdy produkty obróbki muszą pomieścić się w przestrzeniach między ziarnami. Przestrzenie te zostały wyznaczone (rys. 9) dla wyniesień nad płaszczyzną kontaktu, oddaloną od najwyższego wierzchołka o 40% wartości parametru St.

### 3. Podsumowanie

Wykorzystanie potencjału obróbkowego folii wymaga takiego doboru warunków i parametrów obróbki, aby przestrzenie między ziarnami były możliwie najlepiej wypełnione, co zapewnia minimalizację kosztów narzędziowych. Należy uwzględnić, iż wraz z wzrostem rozmiaru charakterystycznego ziarna dla badanych folii ściernych przestrzeń między ziarnami również wzrasta, w wyniku rzadszego upakowania powierzchni czynnej narzędzia agregatami. Prędkość obrotową przedmiotu należy dobrać w proporcji do wartości iloczynu sumy objętości przestrzeni między ziarnami odniesionej do szerokości folii i prędkości posuwu folii ścierniej.

Można oczekiwać, że foliowe taśmy ściernie, które w swojej strukturze posiadają agregaty ziaren mogą brać udział w procesie obróbki więcej niż jeden raz. Wskazuje na to liczba potencjalnie aktywnych agregatów. Takiej cechy nie można przypisać do folii ściernych z wyraźnie wyodrębnionymi pojedynczymi ziarnami.

Oznacza to zwiększenie wydajności oraz zmniejszenie kosztów produkcji tych elementów części maszyn i urządzeń, dla których do obróbki wykończeniowej zastosowane zostaną foliowe taśmy ściernie z agregatowaniem ziaren.

### 4. Literatura

- [1] Auguściński A., Weiss E.: Dogładanie oscylacyjne foliami ściernymi, XVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin, 1993.
- [2] Kacalak W., Lipiński D., Tomkowski R.: Podstawy jakościowe oceny stanu powierzchni kształtowanych z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 54, 2008, str. 180-183.
- [3] Ściegienka R.: Podstawy doboru warunków i parametrów procesu mikrowygładzania powierzchni z zastosowaniem foliowych taśm ściernych. Praca doktorska, Koszalin, 2008.
- [4] Norma: European Report EUR 15178N, 1993, ISBN 0704413132
- [5] Kacalak W., Tandecka K.: Metodyka oceny topografii folii ściernych ze szczególnym uwzględnieniem rozmieszczenia ziaren ściernych, Podstawy i technika obróbki ścierniej, Materiały XXXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź 8-10 września 2010 r., str. 193-205.
- [6] Kacalak W., Tandecka K., Tomkowski R.: Metodyka analizy topografii powierzchni czynnej folii ściernych, Podstawy i technika obróbki ścierniej, Materiały XXXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź 8-10 września 2010 r., str. 177-193.