

Michał GDULA, Jan BUREK, Jacek MISIURA, Łukasz ŻYŁKA

POLITECHNIKA RZESZOWSKA IM. I. ŁUKASIEWICZA,  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

## Topografia powierzchni swobodnej ukształtowanej w procesie 5-osiowego frezowania

Mgr inż. Michał GDULA

Mgr inż. Michał Gdula pracuje w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej na stanowisku asystenta. Jest także doktorantem w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn. Specjalizuje się w zagadnieniach dotyczących komputerowych technik CAD/CAM/CAE w wytwarzaniu wyrobów, podstaw obróbki skrawaniem oraz maszyn technologicznych.



e-mail: gdulam@prz.edu.pl

Mgr inż. Jacek MISIURA

Mgr inż. Jacek Misiura jest pracownikiem naukowo-technicznym w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej. Specjalizuje się w zagadnieniach dotyczących metrologii technicznej, miernictwa i systemów pomiarowych.



e-mail: jmisiura@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Jan BUREK

Dr hab. inż. Jan Burek pracuje w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Jest także kierownikiem tej jednostki. Autor lub współautor ponad 80 publikacji, 5 wdrożeń przemysłowych oraz 7 patentów zastosowanych w przemyśle. Jest autorem 5 skryptów uczelnianych.



e-mail: jburek@prz.edu.pl

Dr inż. Łukasz ŻYŁKA

Dr inż. Łukasz Żyłka pracuje w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej na stanowisku adiunkta. W pracy naukowo-dydaktycznej zajmuje się programowaniem maszyn CNC, podstawami obróbki skrawaniem oraz ściernej, doborem narzędzi obróbkowych i oprzyrządowania oraz diagnostyką procesów wytwarzania.



e-mail: zylka@prz.edu.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę topografię powierzchni łopatki turbiny ukształtowanej metodą symultanicznego 5-osiowego frezowania czołowego. Badania dotyczyły obrobionych powierzchni wypukłych modelu testowego podzielonego na regiony wykonane z różnymi nastawami kąta prowadzenia  $\alpha$ . Topografię badanych powierzchni oceniono parametrami struktury geometrycznej powierzchni. Stwierdzono, że topografia powierzchni pióra łopatki turbiny jest ściśle uzależniona od orientacji osi narzędzia oraz zmiennego promienia krzywizny profilu tworzącego powierzchnię.

**Słowa kluczowe:** kąt prowadzenia, symultaniczne frezowanie 5-osiowe, topografia powierzchni, łopatka turbiny.

### Sculptured surface topography shaped by 5-axis milling

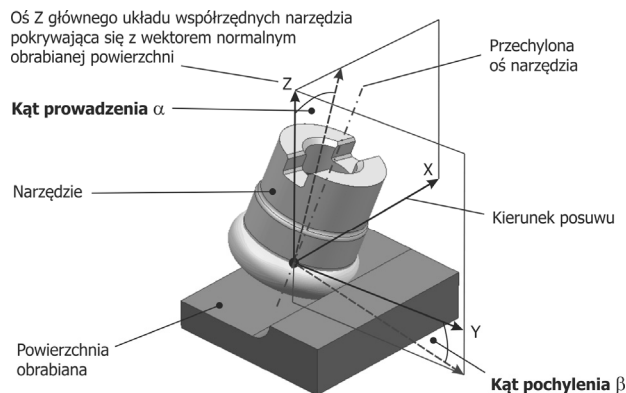
#### Abstract

This paper presents the analysis of surface topography of a turbine blade shaped by simultaneous 5-axis face milling. Investigations concern the machined convex surface of the test model. To reach high surface quality, sculptured surfaces are generally obtained using a high-speed machining (HSM) process. The machined surface quality thus results from the choice of the strategy and the corresponding cutting parameters (tool inclination, feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut) (Fig. 1) [1-6, 8]. The surface topography was measured by InfiniteFocus Real 3D measuring equipment (Alicona firm) (Fig. 4). The rectangle sampling area of 2,84 mm x 2,15 mm was measured. The sampling interval was 3,8  $\mu\text{m}$ . The distance between the paths was 9,2  $\mu\text{m}$ . Form errors were eliminated by a polynomial of 2th degree. The surface topography was assessed by parameters and functions of 3D surface topography. Table 1 presents the measured surface topography parameters [7, 9]. Figures 5, 6, 7 and 8 shows the surface image, distribution of ordinates and the autocorrelation function depending on the lead angle and radius of the curvature profile of the turbine blade. It was found that the value of the lead angle  $\alpha$  should be determined depending on the radius of curvature of the sculptured surface so a fixed value for the whole surface cannot be assumed.

**Keywords:** lead angle, simultaneous 5-axis milling, surface topography, turbine blade.

### 1. Wstęp

Przestrzennie złożone powierzchnie są obecnie szeroko stosowane w projektowaniu skomplikowanych części, takich jak np.: łopatka turbiny. Powierzchnie te kształtowane są zazwyczaj przy zastosowaniu obróbki szybkościowej HSM (*High Speed Machining*), która pozwala uzyskać obrabianą powierzchnię o wysokiej jakości [2, 3]. Niejednokrotnie ze względu na złożony kształt części stosuje się obróbkę wieloosiowego frezowania (rys. 1). Tory ruchu narzędzia programowane są w systemach CAM, które w większości posiadają strategie umożliwiające obróbkę dowolnie skomplikowanej geometrii [3, 6]. Jakość i dokładność powierzchni oraz czas obróbki zależą od zastosowanej strategii oraz parametrów tj.: orientacji osi narzędzia, posuwu na ostrze, prędkości skrawania, głębokości i szerokości skrawania itd. [4, 6].



Rys. 1. Kąty: prowadzenia oraz pochylenia w obróbce 5-osiowej  
Fig. 1. Lead and tilt angles in 5 axis machining

Topografia powierzchni ma na celu szczegółowy opis funkcji powierzchniowych badanego regionu, co pozwala dokładnie ocenić powierzchnię, a na jej podstawie zweryfikować proces

wytwarzania. Dlatego też proces obróbki wieloosiowej jest ściśle powiązany z topografią kształtowanej powierzchni swobodnej [8].

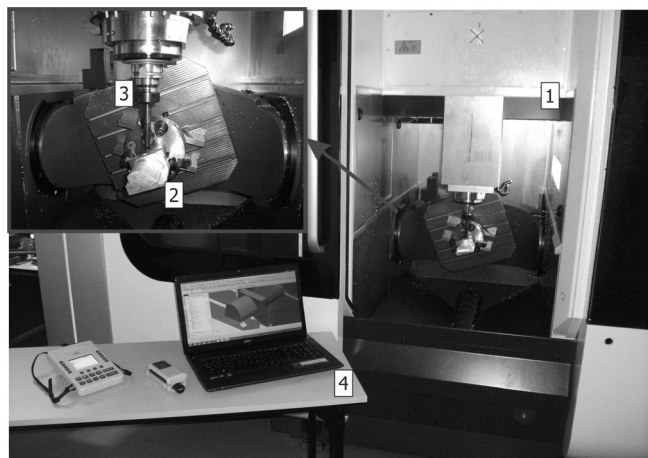
Biorąc pod uwagę wyniki badań opisane w pracy [2] wpływ na jakość oraz dokładność powierzchni pióra łopatki turbiny mają 5-osiowe parametry kątów prowadzenia i/lub pochylenia określone względem wektora normalnego obrabianej powierzchni (rys. 1) oraz złożona geometria części [1, 3, 5].

Topografia powierzchni łopatki turbiny wpływa na właściwości mechaniczne i fizyczne w strefie kontaktu z czynnikiem wpływającym pióro, dlatego też jej kształtowanie w procesie 5-osiowego frezowania jest sprawą bardzo istotną [3].

Celem badań było określenie wpływu kąta prowadzenia  $\alpha$  oraz zmiennego promienia krzywizny profilu pióra łopatki, jaki wywierają na ostateczny obraz topografii powierzchni w procesie symultanicznego 5-osiowego frezowania czołowego.

## 2. Warunki badań

Materiałem obrabianym był stop aluminium AW-2017A. Próby skrawania przeprowadzono na 5-osiowym centrum obróbkowym HSC 55 linear firmy DMG. Wykonano obróbkę modelu testowego odzwierciedlającego powierzchnię wypukłą pióra łopatki turbiny (rys. 2). Zastosowano składany frez toroidalny o średnicy 12 mm firmy Sandvik Coromant typ R300-012A16L-07L z dwiema płytkami skrawającymi o promieniu naroża 3,5 mm typ R300-0720E-MM 1040, pokryte warstwą węgla gatunku 1040 pokryte metodą PVD.



Rys. 2. Stanowisko obróbki: 1-centrum obróbkowe HSC 55 linear, 2-model testowy, 3-frez toroidalny, 4-komputer z systemem CAD/CAM

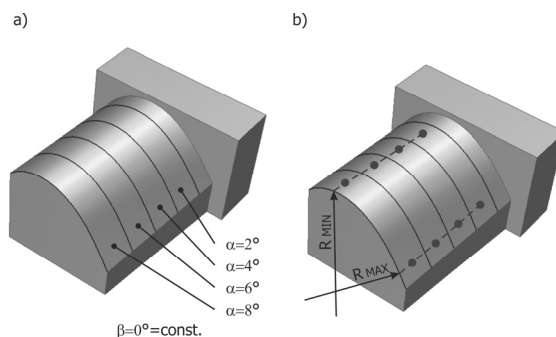
Fig. 2. Working station: 1-machining center HSC 55 linear, 2-test model, 3-toroidal cutter, 4-PC with CAD/CAM system

Parametry technologiczne procesu skrawania przyjęto jako stałe dla każdej z obrabianych powierzchni:

- posuw na ostrze  $f_z = 0.08 \text{ mm/ostre}$ ,
- odległości między ścieżkami narzędzia  $1 \text{ mm}$ ,
- szybkość skrawania  $v_c = 335 \text{ m/min}$ ,

Obróbkę realizowano z udziałem cieczy chłodziwo-smarującej w postaci 7% roztworu wodnego emulsji Toolway firmy Statoil. Zmieniano kąty prowadzenia  $\alpha$ , które przyporządkowano do poszczególnych regionów testowych. Pomiaru topografii poszczególnych powierzchni testowych wykonano w punktach pomiarowych znajdujących się odpowiednio na minimalnym i maksymalnym promieniu krzywizny profilu pióra łopatki turbiny (rys. 3).

Stanowisko badawcze składało się z mikroskopu optycznego InfiniteFocus Real 3D firmy ALICONA wykorzystującego metodę światła białego, wyposażonego w system skanujący i analizujący pomiar InfiniteFOCUS G4 3.5.1.5 (rys. 4). Prostokątny obszar pomiaru miał długość boku 2,84 mm oraz szerokość 2,15 mm. Otrzymano w każdym z przeprowadzonych pomiarów  $812 \times 616$  punktów pomiarowych.



Rys. 3. Model testowy: a) wartości kąta wyprzedzenia  $\alpha$ , b) punkty pomiarowe oraz promienie krzywizny

Fig. 3. Test model: a) lead angle value, b) measurement points and the curvature radius

Do pomiaru użyto obiektywu IFM G4 5x. Pionowa rozdzielczość kroku próbkowania wynosiła  $3,8 \mu\text{m}$ , natomiast rozdzielczość boczna  $9,2 \mu\text{m}$ . Rozdzielczość skanowania całego obszaru wynosiła  $1624 \times 1232$  punktów. Czas pomiaru wyniósł 10 s dla każdej z badanych powierzchni. Z powyższych parametrów system IFM ALICONA dobrał odpowiednią prędkość skanowania. Obliczenia parametrów topografii badanych powierzchni przeprowadzono programem IFM G4. Zeskanowane powierzchnie zostały aproksymowane wielomianem 2 stopnia celem otrzymania wyników w postaci parametrów struktury geometrycznej powierzchni.



Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1-stół pomiarowy, 2-głowica pomiarowa, 3-komputer z oprogramowaniem IFM G4

Fig. 4. Experimental setup: 1-measuring table, 2-measuring head, 3-computer with IFM G4 software

Wysokość topografii badanej powierzchni określono średnim arytmetycznym  $Sa$  i średnim kwadratowym  $Sq$  odchyleniem wysokości powierzchni, maksymalną wysokością powierzchni  $Sz$ , wysokością najwyższego punktu powierzchni  $Sp$ , głębokością najniższego punktu powierzchni  $Sv$ . Parametry te obliczano w obszarze próbkowania. Rozkład rzędnych powierzchni określono pochyłością profilu  $Ssk$  oraz współczynnikiem skupienia – kurtozą profilu  $Sku$ . Wzięto pod uwagę wartości objętości materiału najwyższych szczytów powierzchni  $Vmp$ , objętości materiału rdzennego obszaru powierzchni  $Vmc$ , objętość martwą obszaru rdzennego powierzchni  $Vvc$  oraz objętość martwą dolin powierzchni  $Vvv$ . Parametry objętościowe były wyliczane dla całej powierzchni. Wyznaczono parametry funkcjonalne wskaźnika nośności  $Sbi$ , wskaźnika zatrzymania cieczy przez rdzeń  $Sci$  oraz wskaźnika zatrzymania cieczy przez wgłębienia  $Svi$ . Parametry funkcjonalne są ważnymi parametrami tribologicznymi stosowanymi do analizy powierzchni stykowych, np. pióra łopatki turbiny [7]. Wzięto także pod uwagę wartość wymiaru fraktalnego  $DAS$ . Do znalezienia priorytetowych kierunków okresowo powracających struktur powierzchni posłużono się parametrami automatycznej korelacji: długością odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji

$Sal$ , wskaźnikiem tekstury powierzchni  $Str$  oraz kierunkiem tekstury powierzchni  $Std$ . Do analizy wzięto także parametry hybrydowe: średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni  $Sdq$  oraz rozwinięcie powierzchni  $Sdr$ . Dla badanych powierzchni obliczono także krzywe obciążenia granicznego wraz z parametrami: rdzenia głębokości chropowatości  $Sk$ , zredukowanej wysokości szczytów  $Spk$ , zredukowanej wysokości dolin  $Svk$ , komponentów materiału rdzeniowego  $Srm1$  oraz  $Srm2$  [7, 9].

### 3. Wyniki badań i ich analiza

Do analizy wybrano wyniki otrzymane dla kąta prowadzenia  $\alpha=4^\circ$  oraz  $\alpha=8^\circ$  (tab. 1), które jak wynika także z pracy [1] reprezentują dwa skrajne regiony o otrzymanych odpowiednio najlepszych i najgorszych wartościach parametru  $R_a$  dla badanej powierzchni testowej.

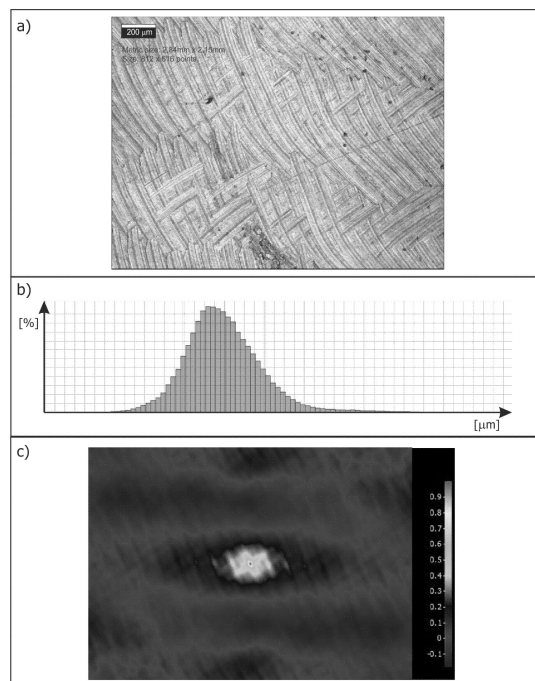
Tab. 1. Parametry topografii wypukłej powierzchni łopatki turbiny  
Tab. 1. Parameters of the convex surface topography of the turbine blade

Parametry	$\alpha=4^\circ$		$\alpha=8^\circ$	
	$R_{MIN}=23,8$ mm	$R_{MAX}=126,4$ mm	$R_{MIN}=23,1$ mm	$R_{MAX}=164,2$ mm
$Sa$ [ $\mu$ m]	3,05	2,22	3,21	2,49
$Sq$ [ $\mu$ m]	4,15	2,83	4,1	3,13
$Sz$ [ $\mu$ m]	45,7	27,48	76,81	28,64
$Sp$ [ $\mu$ m]	28,32	13,43	31,49	14,86
$Sv$ [ $\mu$ m]	17,37	14,05	45,31	13,78
$Ssk$ [-]	1,03	-0,25	-0,52	0,27
$Sku$ [-]	6,38	3,26	3,96	3,1
$Sal$ [ $\mu$ m]	176,69	247,91	92,39	172,66
$Str$ [-]	0,45	0,45	0,3	0,12
$Std$ [ $^\circ$ ]	0	-90	0	0
$Sdq$ [-]	0,25	0,18	0,25	0,18
$Sdr$ [%]	3,08	1,68	3,15	1,68
$DAS$ [-]	2,0032	2,0008	2,0028	2,0009
$Sk$ [ $\mu$ m]	8,87	6,93	9,91	8,1
$Spk$ [ $\mu$ m]	6,93	2,54	2,97	3,51
$Svk$ [ $\mu$ m]	3,56	3,4	5,51	2,43
$Srm1$ [%]	12,81	9,53	7,13	11,34
$Srm2$ [%]	91,43	88,33	86,7	92,12
$Vmp$ [ $ml/m^2$ ]	0,36	0,12	0,15	0,17
$Vmc$ [ $ml/m^2$ ]	3,12	2,5	3,67	2,78
$Vvc$ [ $ml/m^2$ ]	4,75	3,26	4,35	4
$Vvv$ [ $ml/m^2$ ]	0,38	0,37	0,58	0,3
$Sbi$ [-]	0,09	0,10	0,05	0,11
$Sci$ [-]	1,14	1,15	1,06	1,28
$Svi$ [-]	0,09	0,13	0,14	0,10

Powierzchnia wykonana z nastawionym parametrem kąta prowadzenia  $\alpha=4^\circ$  ma mniejszą wysokość nierówności powierzchni ( $Sa$ ,  $Sq$ ,  $Sz$ ,  $Sp$ ,  $Sv$ ) aniżeli powierzchnia wykonana z kątem wyprzedzenia  $\alpha=8^\circ$ . Widać także, że wartości powyższych parametrów są inne na maksymalnym i minimalnym promieniu krzywizny profilu badanej powierzchni testowej. Również parametry  $Ssk$  i  $Sku$  będące miarami odpowiednio skośności i smukłości krzywej rozkładu świadczą o tym, iż promień krzywizny wywiera wpływ na topografię powierzchni.

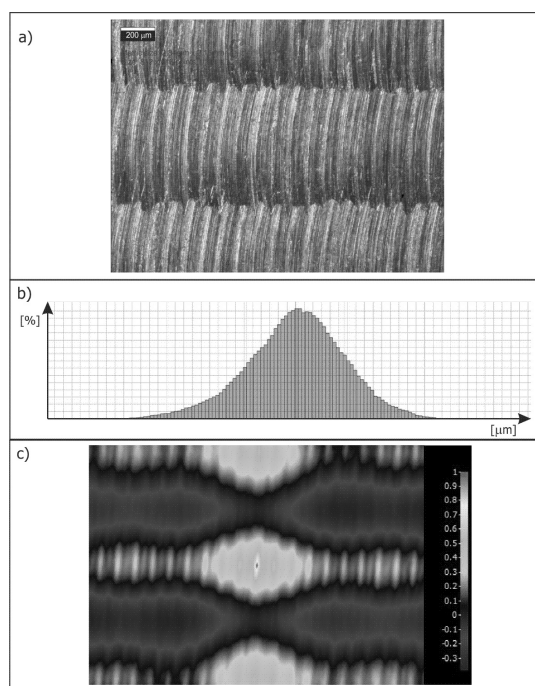
Wartości długości funkcji autokorelacji  $Sal$  wskazują, że mniejsze odstępstwa nierówności posiadają powierzchnie w maksymalnym promieniu krzywizny  $R_{MAX}$  w obu przypadkach nastaw kątów  $\alpha$ . Natomiast wartości parametru wskaźnika tekstury  $Str$  świadczą o anizotropowości wszystkich badanych powierzchni. Odmienność topografii tych powierzchni wynika także z wartości wymiaru fraktalnego  $DAS$ . Ma on większe wartości dla powierzchni o minimalnym promieniu krzywizny  $R_{MIN}$ .

Dla obu analizowanych powierzchni średnia kwadratowa stromość profilu powierzchni  $Sdq$  wskazuje, że w przekroju powierzchni dla  $R_{MIN}$  bardziej dominują strome fragmenty w przeciwieństwie do przekroju powierzchni dla  $R_{MAX}$ . Potwierdzają to także wartości parametru rozwinięcia powierzchni  $Sdr$ , gdzie można zauważyć korzystniejszy wynik w przypadku powierzchni obrobionej z nastawą kąta  $\alpha=4^\circ$ .



Rys. 5. Zdjęcie powierzchni (a), rozkład rzędnych (b), funkcja autokorelacji w układzie 2D (c) powierzchni wykonanej z nastawą kąta  $\alpha=4^\circ$  i promieniu krzywizny  $R_{MIN}=23,8$  mm

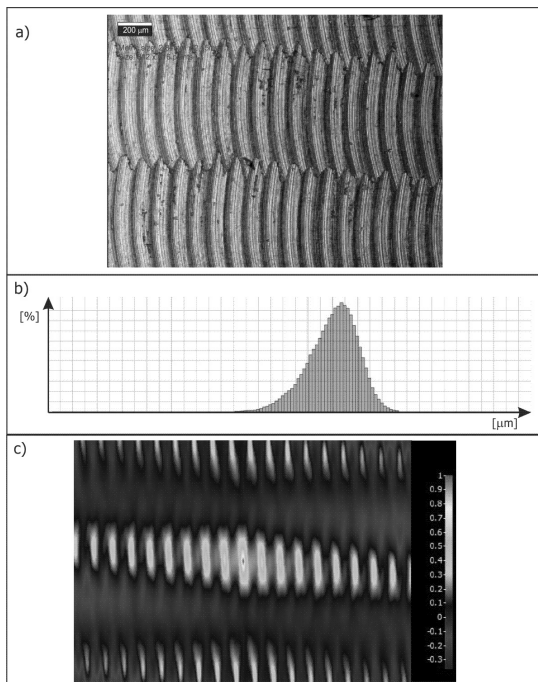
Fig. 5. Image area (a), distribution of the ordinates (b), autocorrelation in 2D configuration (d) surface made of setting the lead angle  $\alpha=4^\circ$  and the radius of curvature  $R_{MIN}=23.8$  mm



Rys. 6. Zdjęcie powierzchni (a), rozkład rzędnych (b), funkcja autokorelacji w układzie 2D (c) powierzchni wykonanej z nastawą kąta  $\alpha=4^\circ$  i promieniu krzywizny  $R_{MAX}=126,4$  mm

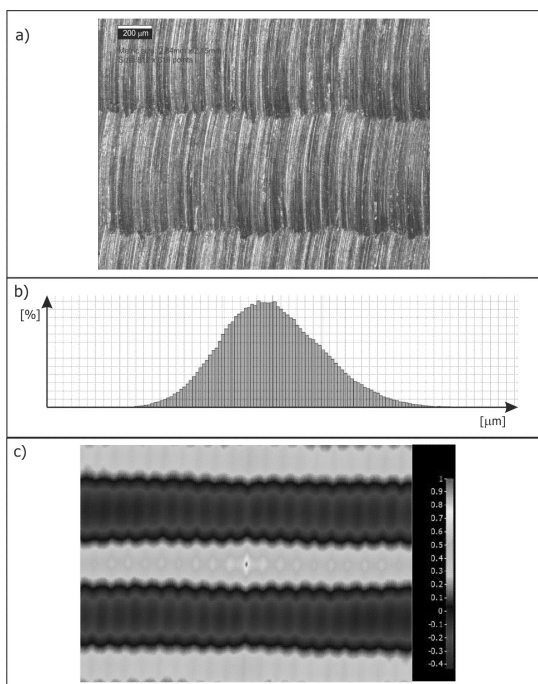
Fig. 6. Image area (a), distribution of the ordinates (b), autocorrelation in 2D configuration (c) surface made of setting the lead angle  $\alpha=4^\circ$  and the radius of curvature  $R_{MAX}=126,4$  mm

Efektywna głębokość chropowatości określona parametrem  $Sk$  przyjmuje korzystne wartości dla powierzchni wykonanej z nastawą kąta prowadzenia  $\alpha=4^\circ$  oraz w maksymalnym promieniu krzywizny  $R_{MAX}$ . Także wartości parametrów  $Spk$  oraz  $Svk$  zmieniają się w zależności od promienia krzywizny badanej powierzchni.



Rys. 7. Zdjęcie powierzchni (a), rozkład rzędnych (b), funkcja autokorelacji w układzie 2D (c) powierzchni wykonanej z nastawą kąta  $\alpha=8^\circ$  i promieniu krzywizny  $R_{MIN}=23,1$  mm

Fig. 7. Image area (a), distribution of the ordinates (b), autocorrelation in 2D configuration (c) surface made of setting the lead angle  $\alpha=8^\circ$  and the radius of curvature  $R_{MIN}=23,1$  mm



Rys. 8. Zdjęcie powierzchni (a), rozkład rzędnych (b), funkcja autokorelacji w układzie 2D (c) powierzchni wykonanej z nastawą kąta  $\alpha=8^\circ$  i promieniu krzywizny  $R_{MAX}=164,2$  mm

Fig. 8. Image area (a), distribution of the ordinates (b), autocorrelation in 2D configuration (c) surface made of setting the lead angle  $\alpha=8^\circ$  and the radius of curvature  $R_{MAX}=164,2$  mm

W przypadku obu regionów testowych udział nośny wgłębień  $S_{rm2}$  jest większy aniżeli udział nośny wierzchołków  $S_{rm1}$ . Wartości parametrów  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vc}$  oraz  $V_{vv}$  analizowanych regionów są do siebie zbliżone i zawierają się w wąskim przedziale zmian tych wartości. Podobnie jest w przypadku parametrów funkcjonalnych  $S_{bi}$ ,  $S_{ci}$ ,  $S_{vi}$ .

Analizując zdjęcia zeskanowanych powierzchni (rys. 5a, 6a, 7a, 8a) zauważyć można, że podczas ruchu skrawania ostrze frezu porusza się najpierw wzdłuż idealnego profilu skrawania, co wynika z odwzorowania zarysu jego ostrza. Wraz ze wzrastającą siłą skrawania obciążającą narzędzie frez wygina się i oddala od programowanego toru ruchu a przy tym również ostrze od idealnego profilu skrawania.

Ponadto obraz powierzchni widoczny na rys. 5a świadczy o błędzie, który wystąpił w trakcie przetwarzania danych przez układ sterowania maszyny. W strukturze geometrycznej występuje także zauważalna okresowość związana z posuwem oraz wyraźnie widoczne na zdjęciach losowe zakłócenia pochodzenia tribologicznego. Ich następstwem jest zwiększenie izotropowości, ukształtowanie charakterystycznego garbu na funkcji autokorelacji oraz obecność składowych losowych, przez co otrzymane powierzchnie mają charakter anizotropowy okresowy mieszany (rys. 5c, 6c, 7c, 8c). Rozkłady rzędnych zbliżone są do rozkładu normalnego (rys. 5b, 6b, 7b, 8b), przy czym na rysunku 5b i 7b widać wyraźnie rozkład rzędnych charakterystyczny dla powierzchni anizotropowej okresowej mieszanej.

#### 4. Wnioski

Z analizy otrzymanych wyników badań topografii powierzchni wypukłej łopatki turbiny wynika, że 5-osiowy parametr kąta prowadzenia  $\alpha$  wpływa na otrzymywaną w procesie obróbki topografię powierzchni. Widać także, iż ciągła zmiana wartości promienia krzywizny profilu pióra łopatki wpływa również na ostateczny rezultat, widoczny w parametrach i funkcjach topografii powierzchni. Oznacza to, że 5-osiowe parametry pozycjonowania narzędzia nie mogą być definiowane jako wartości stałe w przypadku obróbki powierzchni swobodnych. Wartość kąta prowadzenia  $\alpha$  powinna być określana w zależności od promienia krzywizny powierzchni i nie może przyjmować wartości stałej dla całej powierzchni. Determinuje to dalsze prowadzenie badań w tym kierunku oraz opracowanie algorytmu automatycznie dopasowującego wartości kątowych parametrów orientacji osi narzędzia w zależności do promienia krzywizny w punktach kontrolnych generowanych ścieżek narzędzia.

#### 5. Literatura

- [1] Axinte D.A., Dewes R.C.: Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models. *Journal Materials Process Technology* (2002) 127:325–335.
- [2] Burek J., Żyłka Ł., Gdula M., Płodzień M.: Wpływ orientacji osi frezu toroidalnego w obróbce 5-osiowej na chropowatość powierzchni. *Mechanik (CD)* 8-9/2013.
- [3] Lavernhe S., Quinsat Y., Lartigue C.: Model for the prediction of 3D surface topography in 5-axis milling. *International Journal Advanced Manufacture Technology* 51 (2010), 915-924.
- [4] Lavernhe S., Quinsat Y., Lartigue C., Meyer R.: NC-simulation for the prediction of surface finish in 5-axis high-speed machining, in: 3rd CIRP International Conference on High Performance Cutting, Dublin (Ireland), 1, 2008, pp. 387–396.
- [5] Ko T.J., Kim H.S., Lee S.S.: Selection of the machining inclination angle in high-speed ball end milling. *International Journal Advanced Manufacture Technology* (2001) 17:163–170.
- [6] Quinsat Y., Lavernhe S., Lartigue C.: Characterization of 3D surface topography in 5-axis milling. *Wear* 271 (2011), 590–595.
- [7] Oczóś K. E., Liubimov V.: *Struktura geometryczna powierzchni*. OWPRz, Rzeszów 2003.
- [8] Toh C.K.: Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel, *Precision Engineering* 28 (2004) 386–398.
- [9] Whitehouse D. J.: *Handbook of surface metrology*. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 1994.