

# ANALIZA TOPOGRAFII POWIERZCHNI GŁOWY I STOPY ZĘBA KÓŁ ZĘBATYCH FREZOWANYCH OBWIEDNIOWO

Jacek MICHALSKI

W artykule przedstawiono analizę trójwymiarowej topografii obrobionych powierzchni boku zębów kół zębatych walcowych z wyodrębnieniem ich głowy i stopy. Koła zębate wykonano metodą frezowania obwiedniowego. Powierzchnie boku zębów oceniono parametrami i funkcjami stereometrii nierówności powierzchni, ukierunkowaniem powierzchni, powierzchniowymi funkcjami autokorelacji, widmowej gęstości mocy oraz kątowymi wykresami gęstości widmowej mocy, gęstości widmowej mocy skumulowanej i arbitralnej wzdłuż zarysu profilu i zarysu linii powierzchni zębów. Stwierdzono mniejsze wysokości i odstępów nierówności powierzchni bocznej głowy zębów w porównaniu z jego stopą oraz korzystniejszą jej topografię powierzchni.

## 1. WSTĘP

Analiza topografii powierzchni umożliwia kontrolę procesu produkcyjnego, przewidywanie i optymalizację właściwości funkcjonalnych elementów maszyn oraz diagnozowanie procesów technologicznych i diagnozowanie maszyn. Topografia powierzchni boku zębów wpływa na nieuszkodzalność i trwałość zmęczeniową przekładni [3] oraz na jej opory ruch [7], hałaśliwość i drgania [5]. Powierzchnia boków zębów wykonana frezowaniem ma zwykle charakterystyczne wzniesienia i wgłębienia oraz jest geometrycznie nieciągła [1, 4]. Znaczenie dokładności boków zębów i ich topografii powierzchni wzrasta. Bardzo często koła zębate samochodów, produkowane masowo, są frezowane lub dłutowane i dodatkowo wiórkowane lub gładzone oraz utwardzane hartowaniem indukcyjnym, bez szlifowania.

## 2. WARUNKI BADAŃ

Frezowane obwiedniowo koła walcowe o zębach prostych miały wieniec o szerokości 5,1 mm, module 1,814 mm i średnicy podziałowej 156,03 mm. Zastosowano do obróbki monolityczny, jedno zwojowy frez ślimakowy ze stali ASP 2040 o średnicy 70 mm. Ostrza frezu pokryte były warstwą azotku tytanu. Prędkości obwodowa narzędzia wynosiła 140 m/min, osiowy posuw 2 mm/obr i dwa przejścia obróbkowe miały głębokości skrawania 3,7 mm i 0,1 mm. Chłodziwem był olej maszynowy 30 (lepkość w temperaturze 40 °C, 120 mm<sup>2</sup>/s). Bicie promieniowe ostrzy nie przekraczało 0,01 mm. Dopuszczalne zużycie powierzchni przyłożenia wynosiło 0,2 mm.

Pomiar topografii powierzchni zębów kół zębatych przeprowadzono w połowie ich szerokości profilometrem stykowym trójwymiarowy Talyscan 150 firmy Talyron Precision. Obszar pomiaru głowy i stopy zębów był kwadratem o długość boku 1,28 mm. Krok próbkowania i odstęp ścieżek pomiarowych wynosił 10 μm. Prędkość skanowania wynosiła 2 mm/s. Powierzchnię skojarzoną boków zęba opisano wielomianem 8 stopnia dwu zmiennych. Obliczenia parametrów topografii powierzchni przeprowadzono programem Moutains Map Universal firmy Digital Surf i oprogramowaniem własnym.

Identyfikowano szczyty powierzchni z 8 przyległych amplitud w węzłach siatki pomiarowej kwadratowej. Średnią krzywiznę szczytów  $SP_{sc}$  obliczono jako średnią geometryczną krzywiznę wierzchołków prostopadłych profili z 7 współrzędnych oraz średnie arytmetyczne pochylenie powierzchni  $SP_{\Delta a}$  jako pierwiastek kwadratowy sumy kwadratów odpowiednich pochylenia prostopadłych profili z 7 współrzędnych. Odstępy nierówności charakteryzowano wartościami: długością korelacji  $SP_{al}$ , długością fali charakterystycznej powierzchni boku koła zębatego wzdłuż szerokości  $SP(1/f_x)$  i na wysokości zębów  $SP(1/f_y)$ , wyznaczoną punktem największej krzywizny aproksymowanej gęstości widmowej mocy

skumulowanej powierzchniowej. W pracy wyznaczono także średnie arytmetyczne i średnie kwadratowe pochylenie powierzchni  $SP\Delta a$ ,  $SP\Delta q$ . Dla linii zębów oznaczono go  $SP\Delta ax$ , oraz dla profilu zębów na wysokości  $SP\Delta ay$ . Średnią arytmetyczną krzywiznę szczytów  $SPsc$  oznaczono dla linii zębów  $SPscx$  oraz dla profilu zębów  $SPscy$ . Definicja pozostałych parametrów jest zgodna z pracami [2, 6].

### 3. WYNIKI BADAŃ

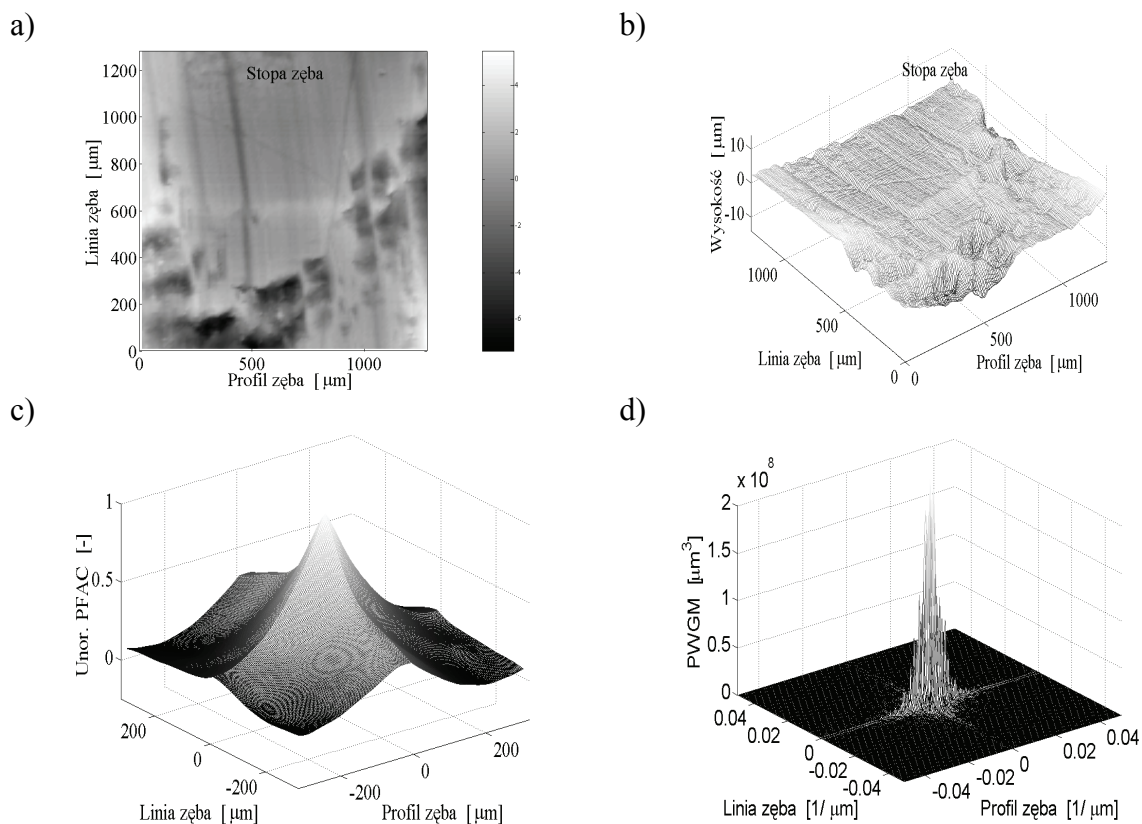
Przestrzenna kinematyka skrawania frezu ślimakowego, podczas frezowania obwiedniowego, kształtuje na bokach zęba wklęsłe wgłębienia "łuskowe" nierówności powierzchni (rys. 1, 2). Po frezowaniu obwiedniowym głowa zębów ma mniejszą wysokość nierówności powierzchni ( $SPa$ ,  $SPq$  i  $SPt$ ), aniżeli ich stopa (tabela 1 i 2.). Wyniki te potwierdza wysokość nierówności zarysu linii i zarysu profilu ( $RPa$ ,  $RPq$ ) analizowanych powierzchni. Cechą charakterystyczną boku zębów jest również większa wysokość nierówności zarysu profilu niż zarysu linii. Mniejsze są także odstępki nierówności powierzchni głowy zębów w porównaniu z odstępami nierówności powierzchni ich stopy. Świadczą o tym długości funkcji autokorelacji  $SPal$  oraz długości charakterystycznych fal  $SP(1/fx)$  i  $SP(1/fy)$ , wyznaczone punktem największej krzywizny skumulowanej aproksymowanej widmowej gęstości mocy. Symulacja skrawania metodą frezowania obwiedniowego, w środowisku CAD, potwierdza charakter zmian wysokości i odstepu nie-

**Tabela 1.** Parametry i funkcje topografii powierzchni głowy i stopy boku zębów kół zębatych frezowanych obwiedniowo

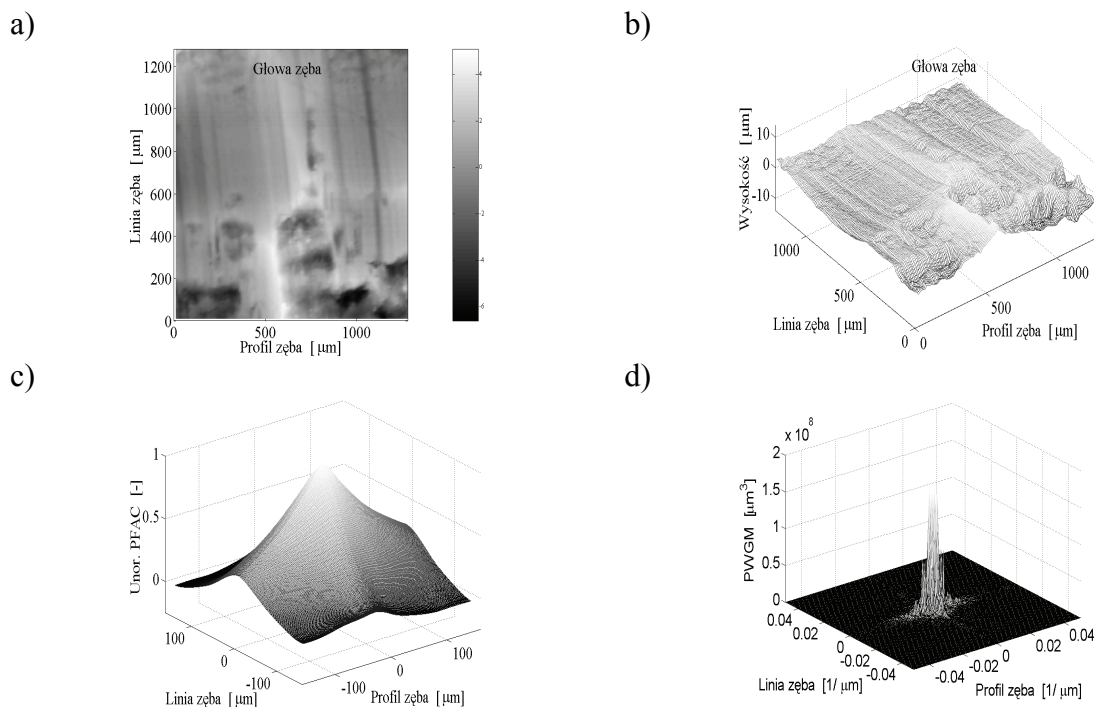
Parametry	Bok wchodzący do obróbki	Bok wychodzący z obróbki		
	Cały bok	Cały bok	Obszar głowy zęba	Obszar stopy zęba
$SPa$ ( $\mu\text{m}$ )	6,49	4,13	1,80	3,08
$SPq$ ( $\mu\text{m}$ )	7,69	4,93	2,24	3,88
$SPt$ ( $\mu\text{m}$ )	41,80	31,90	19,15	21,55
$SPsk$ (-)	-0,14	0,22	-0,29	-0,01
$SPku$ (-)	2,34	2,37	3,69	2,67
$SPmmr$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ )	0,0196	0,0148	0,0090	0,0118
$SPmvr$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ )	0,0222	0,0171	0,0102	0,0500
$SPds$ ( $\text{pks}/\text{mm}^2$ )	744	714	811	667
$SPtr$ (-)	0,40	0,47	0,33	0,40
$SPal$ ( $\mu\text{m}$ )	630	394	196	294
$S_{iso}$ (%)	40	47	33	40
$SPfd$ (-)	2,04	2,11	2,06	2,01
$SP\Delta q$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0658	0,0641	0,0660	0,0600
$SPsc$ ( $1/\mu\text{m}$ )	0,0110	0,0093	0,0092	0,0094
$SPdr$ (%)	0,210	0,20	0,22	0,18
$SP(1/fx)$ ( $\mu\text{m}$ )	111	500	107	112
$SP(1/fy)$ ( $\mu\text{m}$ )	133	333	97	108
$SP\Delta ax$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0218	0,0208	0,0199	0,0223
$SP\Delta ay$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0307	0,0286	0,0276	0,0304
$SPscx$ ( $1/\mu\text{m}$ )	0,0046	0,0038	0,0040	0,0039
$SPscy$ ( $1/\mu\text{m}$ )	0,0049	0,0043	0,0040	0,0044
$SPpq/SPt$ (-)	0,18	0,12	0,13	0,13
$SPvq/SPt$ (-)	0,13	0,19	0,21	0,23
$SPmq$ (-)	0,05	0,83	0,71	0,73
$SPpk/SPt$ (-)	0,31	0,23	0,23	0,24
$SPvk/SPt$ (-)	0,22	0,23	0,28	0,24
$SPk/SPt$ (-)	0,13	0,18	0,19	0,16
$Sr1$ (-)	0,12	0,10	0,14	0,16
$Sr2$ (-)	0,82	0,81	0,83	0,84

**Tabela 2.** Parametry i funkcje zarysu profilu i linii boku zęba wchodzącego do obróbki i wychodzącego z obróbki frezowaniem obwiedniowym

Parametry	Frezowanie obwiedniowe			
	Profil zęba		Linia zęba	
	Wchodząca do obróbki	Wychodząca z obróbki	Wchodząca do obróbki	Wychodząca z obróbki
Pa ( $\mu\text{m}$ )	1,60	1,23	2,12	0,93
Pq ( $\mu\text{m}$ )	1,94	1,57	2,78	1,08
Pt ( $\mu\text{m}$ )	9,74	9,22	13,23	4,96
PzJIS ( $\mu\text{m}$ )	6,89	6,05	8,28	3,39
Pp ( $\mu\text{m}$ )	5,17	5,16	5,58	2,22
Pp/Pt (-)	0,53	0,56	0,42	0,45
Psk (-)	0,57	0,21	-0,44	-0,16
Pku (-)	2,68	3,18	2,93	2,08
Pk ( $\mu\text{m}$ )	5,16	2,63	6,62	2,93
Ppk ( $\mu\text{m}$ )	2,34	3,04	1,98	0,69
Pvk ( $\mu\text{m}$ )	2,03	1,75	3,57	1,24
Mr1 (%)	12	14	12	10
Mr2 (%)	88	84	86	86
Ppq ( $\mu\text{m}$ )	0,88	1,84	0,79	0,60
Pvq ( $\mu\text{m}$ )	1,75	1,48	2,91	0,99
Pmq (%)	2	17	5	7
PS ( $\mu\text{m}$ )	14	13	20	10
PSm ( $\mu\text{m}$ )	176	86	222	182
P $\Delta$ q ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0456	0,0660	0,0398	0,0314
P $\Delta$ a ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0286	0,0318	0,0216	0,0185
P $\lambda$ q ( $\mu\text{m}$ )	268	150	439	216
P(1/f) ( $\mu\text{m}$ )	105	70	135	132
P( $\beta$ 0,1) ( $\mu\text{m}$ )	301	218	819	608



**Rys. 1.** Mapa szarości topografii powierzchni (a), widok izometryczny (b), powierzchniowa funkcja autokorelacji (c), powierzchniowa widmowa gęstość mocy (d) powierzchni wychodzącej z obróbki frezowaniem obwiedniowym stopy zęba koła zębatego

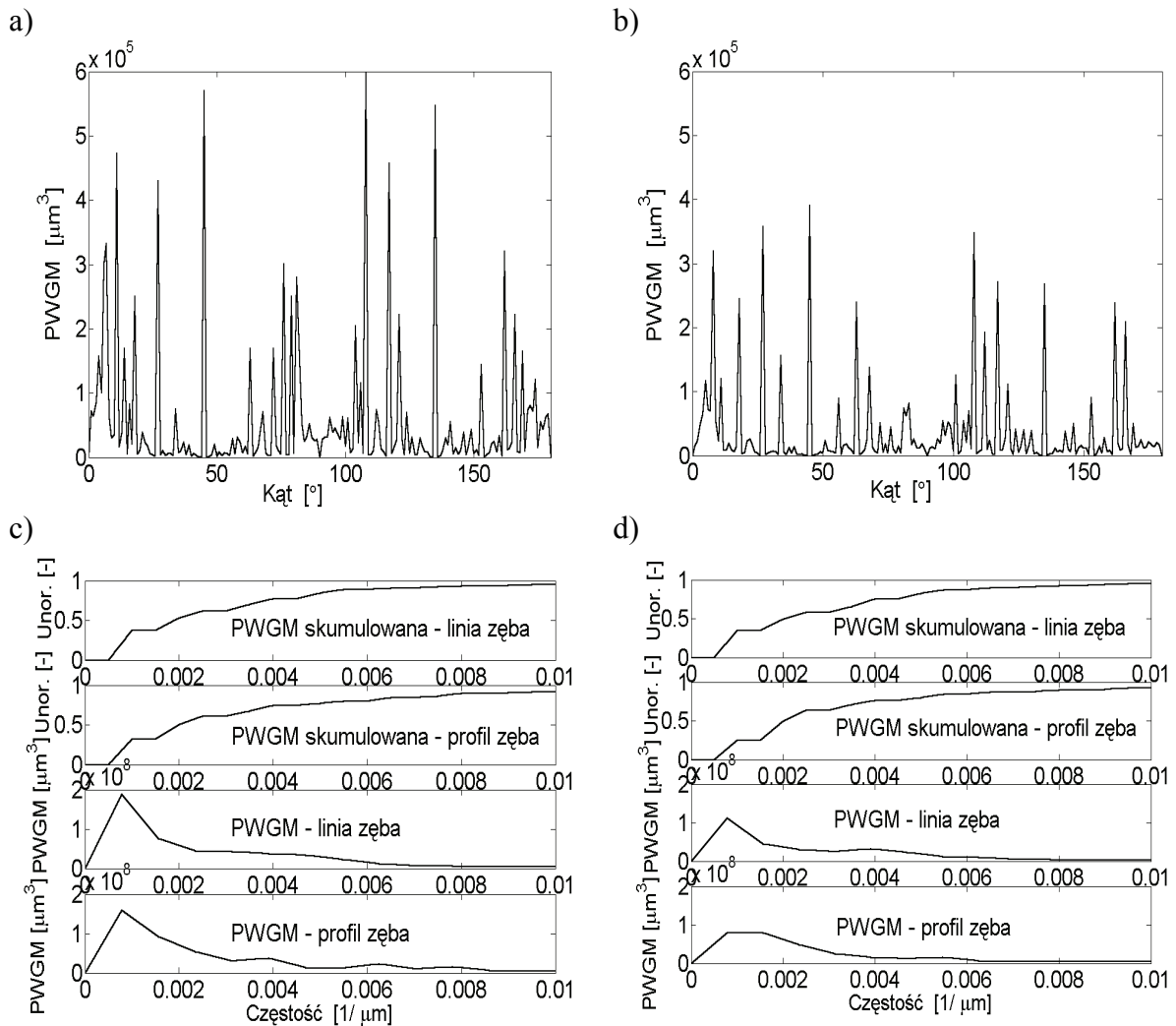


**Rys. 2.** Mapa szarości topografii powierzchni (a), widok izometryczny (b), powierzchniowa funkcja autokorelacji (c), powierzchniowa widmowa gęstość mocy (d) powierzchni wychodzącej z obróbki frezowaniem obwiedniowym głowy zęba koła zębatego

równości powierzchni głowy i stopy zębów. Pochylenie nierówności powierzchni  $SP\Delta q$  głowy zębów jest także mniejsze niż ich stopy. O korzystniejszych cechach nierówności powierzchni głowy zębów decyduje także mniejsza krzywizna szczytów  $SPsc$  i większa gęstość szczytów  $SPds$ . Potwierdzają to także mniejsze wartości parametrów pochylenia zarysu linii  $SP\Delta ax$  i profilu zębów  $SP\Delta ay$  oraz mniejsze krzywizny wierzchołków tych profili  $SPscx$ ,  $SPscy$ . Te cechy geometryczne głowy zębów powodują odpowiednią ich mniejszą wartość średniej objętość materiału nierówności powierzchni  $SPmmr$  i mniejszą wartość objętości pustek obszaru głębokich wgłębień  $SPmvr$ .

Odmienność topografii powierzchni głowy i stopy zębów wynika także z wartości wymiaru fraktalnego  $SPfd$  (tabela 1 i 2). Ma on większe wartości dla powierzchni głowy zębów. Równocześnie jednak teoretyczny błąd ewolwenty profilu głowy zębów w obróbce obwiedniowej jest większy niż stopy. Przedstawione cechy geometryczne powierzchni zębów powodują ich mniejszą wartość powierzchniowej i kątowej widmowej gęstości mocy dla głowy jak również mniejsze wartości skumulowane gęstości widmowej mocy wzdłuż ich linii i profilu (rys. 3). Wyniki te można interpretować większym zużyciem tribologicznym krawędzi i powierzchni wierzchołków frezu ślimakowego aniżeli jego boków.

Funkcja gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni (rys. 1, 2) wskazuje na niewielkie ukierunkowanie topografii powierzchni zębów frezowanych obwiedniowo. Na rysunkach obrazu widmowej gęstości mocy są obrócone o  $90^\circ$  w stosunku do ukierunkowania powierzchni. Niewielki udział w mocy widma mają nierówności powierzchni boku zęba o małych długościach fal. Bardzo duży z kolei fale o dużych długościach. Powierzchniowa funkcja autokorelacji jest ukierunkowana zgodnie z przebiegiem śladów obróbki na powierzchni boku zębów (rys. 1, 2). Jej kształt wskazuje, że powierzchnie głowy i stopy boku zębów frezowanych obwiedniowo są okresowo-losowe (quasi-okresową). Na przedstawionych rysunkach powierzchniowa funkcja autokorelacji zawiera tylko 496 danych. Powierzchniową gęstość widmowa mocy sporządzono ze zdecydowanie większej liczby danych wynoszących 4096. Umożliwiła ona dokładniejszą charakterystykę powierzchni głowy i stopy zębów.

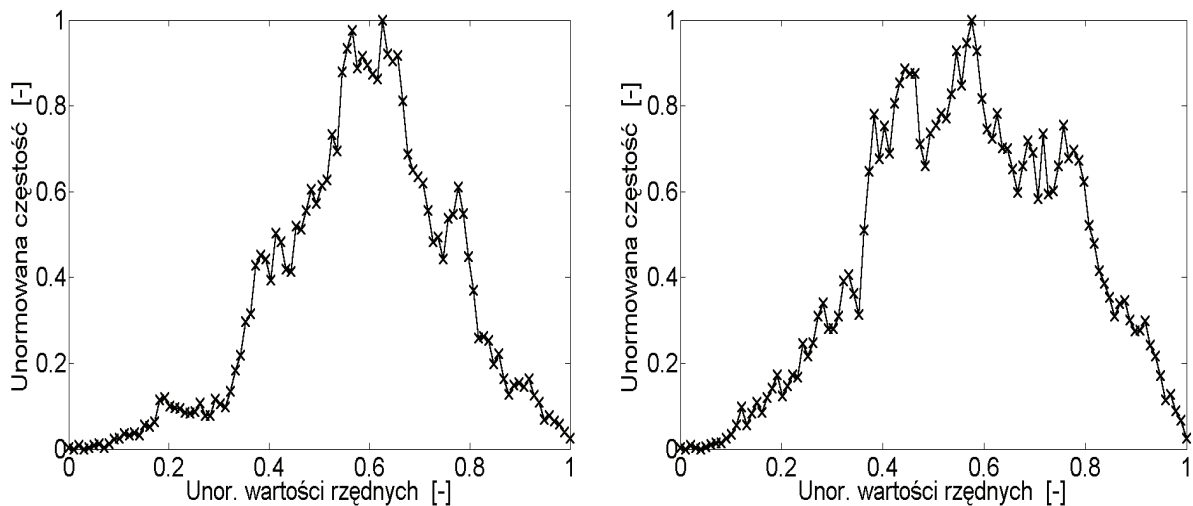


**Rys. 3.** Charakterystyka powierzchni stopy (a, c) i głowy (b, d) zęba koła zębatego walcowego frezowanego obwiedniowo dla wychodzącej z obróbki powierzchni boku zęba: (a, b) kątowy wykres gęstości widmowej mocy, (c, d) gęstość widmowa mocy skumulowana i arbitralna wzdłuż linii i profilu zęba

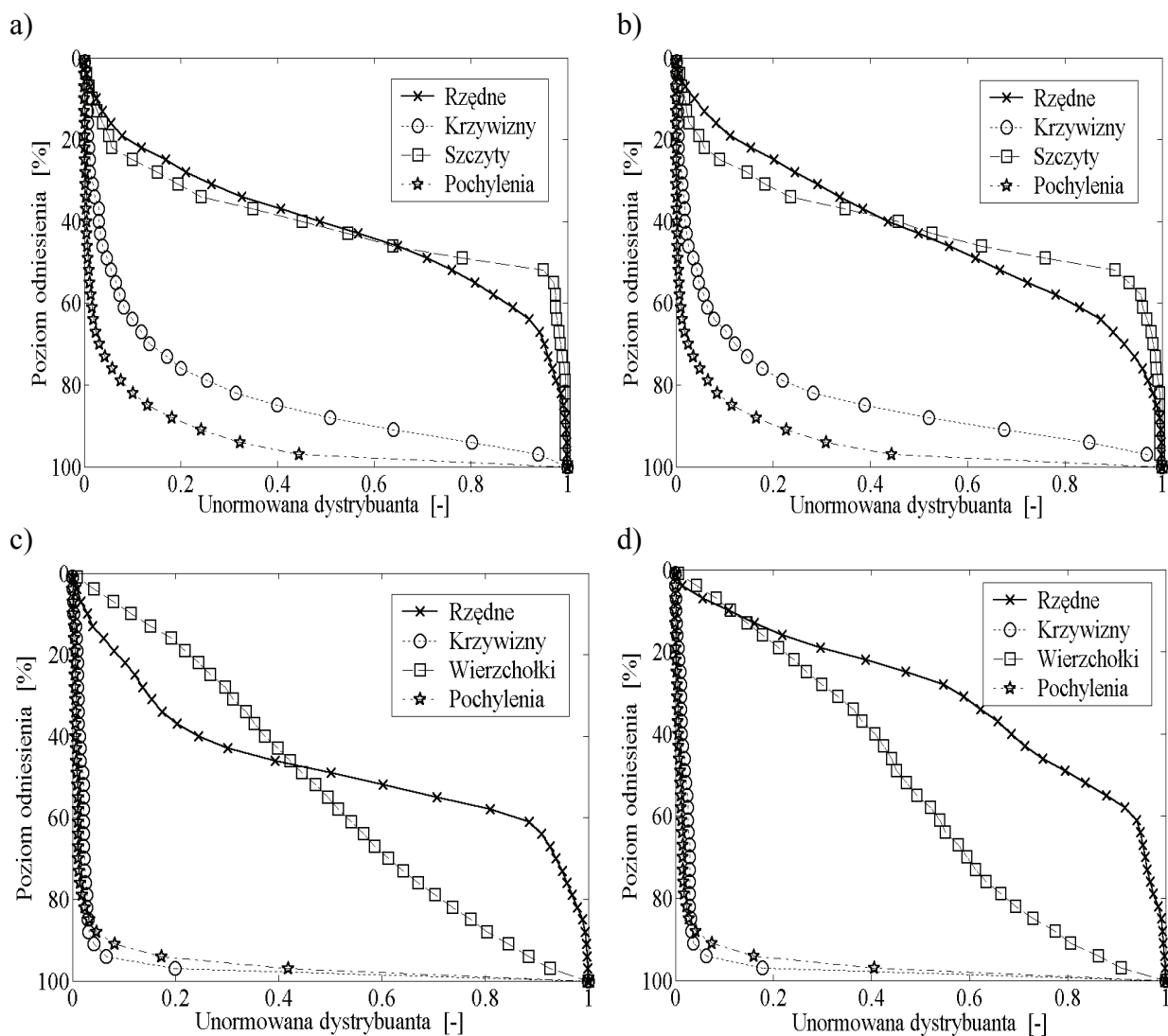
Spektrum kątowe gęstości widmowej mocy wskazuje na zbliżone ukierunkowanie frezowanego boku zębów na ich powierzchni (rys. 3). Powierzchnia boku zębów frezowanych obwiedniowo jest więc słabo ukierunkowana. Izotropowość powierzchni głowy analizowanych zębów jest większa aniżeli ich stopy. Ocena wynika z wartości współczynnika struktury powierzchni  $SP_{tr}$  oraz wskaźnika izotropowości  $S_{iso}$  (tabela 1 i 2). Potwierdzają to także wyniki badań wysokości nierówności, odstepu, krzywizny i skumulowanej gęstości widmowej mocy dla zarysu linii i zarysu profilu zęba.

Krzywa udziału materiałowego powierzchni głowy i stopy zębów ma zbliżone właściwości za pomocą opisu metodą linearyzacji, dystrybuanty i aproksymacji funkcją matematyczną o trzech parametrach (rys. 5). Głębokości wzniesień  $SP_{pk}$  i odchylenie standardowe ich wysokości  $SP_{pq}$  dla głowy i stopy zębów są odpowiednio zbliżone. Głębokość rdzenia  $SP_k$  i pochylenie  $dp_l$  jest większe dla głowy zębów. Głębokości wgłębień  $SP_{vk}$  i jego odchylenie standardowe nierówności  $SP_{vq}$  są większe dla stopy zębów. Również udział materiałowy  $SP_{r2}$  i  $SP_{mq}$  są większe dla stopy zębów. Stwierdzone właściwości powierzchni zębów powodują nieco większą asymetrię rozkładu rzędnych  $SP_{sk}$  i większe nachylenie  $SP_{ku}$  ich głowy aniżeli stopy (tabela 1, 2, rys. 4).

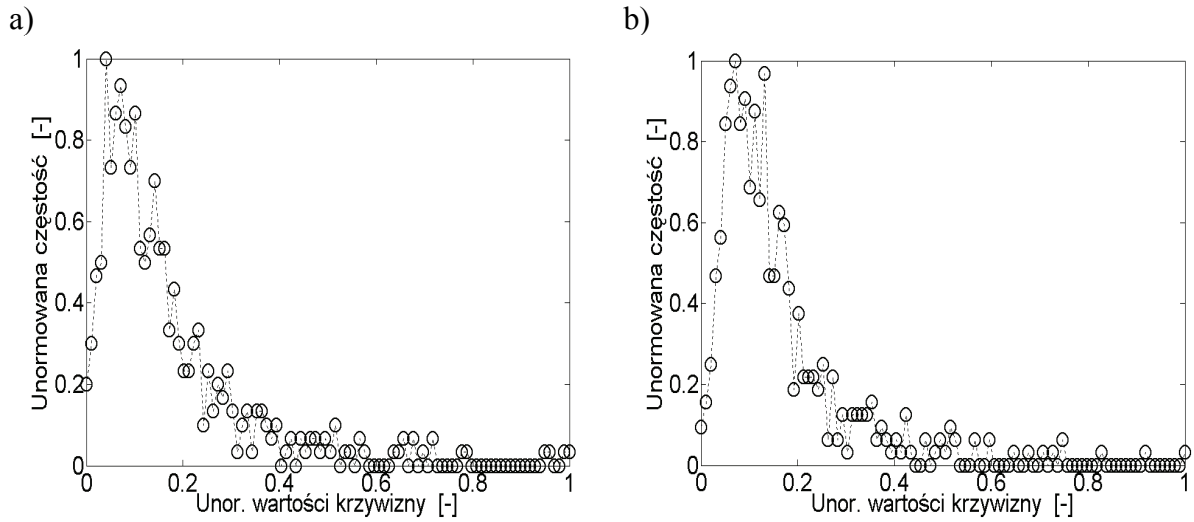
a) b)



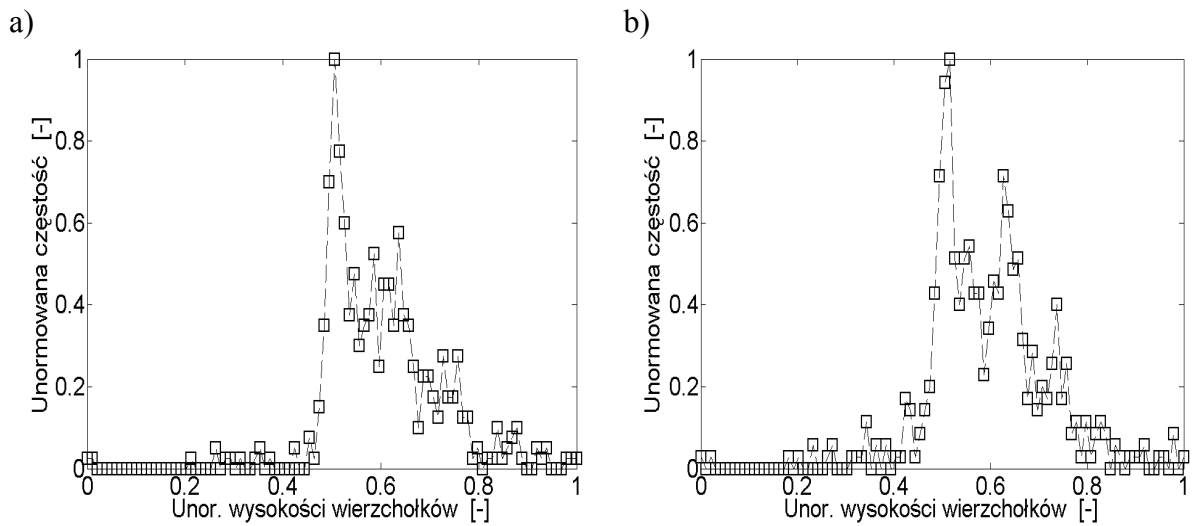
**Fig. 4.** Gęstość prawdopodobieństwa rzędnych powierzchni boku zęba wychodzącego z obróbki frezowaniem obwiedniowym dla stopy (a) i głowy (b)



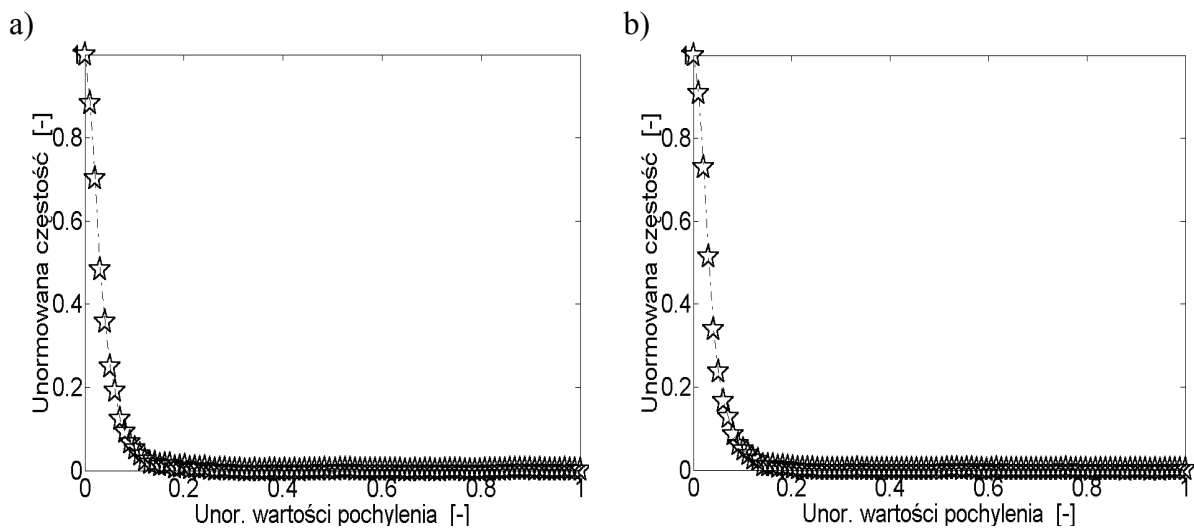
**Fig. 5.** Dystrybuanty gęstość prawdopodobieństwa: rzędnych powierzchni, krzywizny szczytów, wysokości szczytów, pochylenia powierzchni boku zęba wychodzącego z obróbki (a, b) i wchodzącego do obróbki frezowaniem obwiedniowym (c, d): dla stopy (a, c) i głowy (b, d)



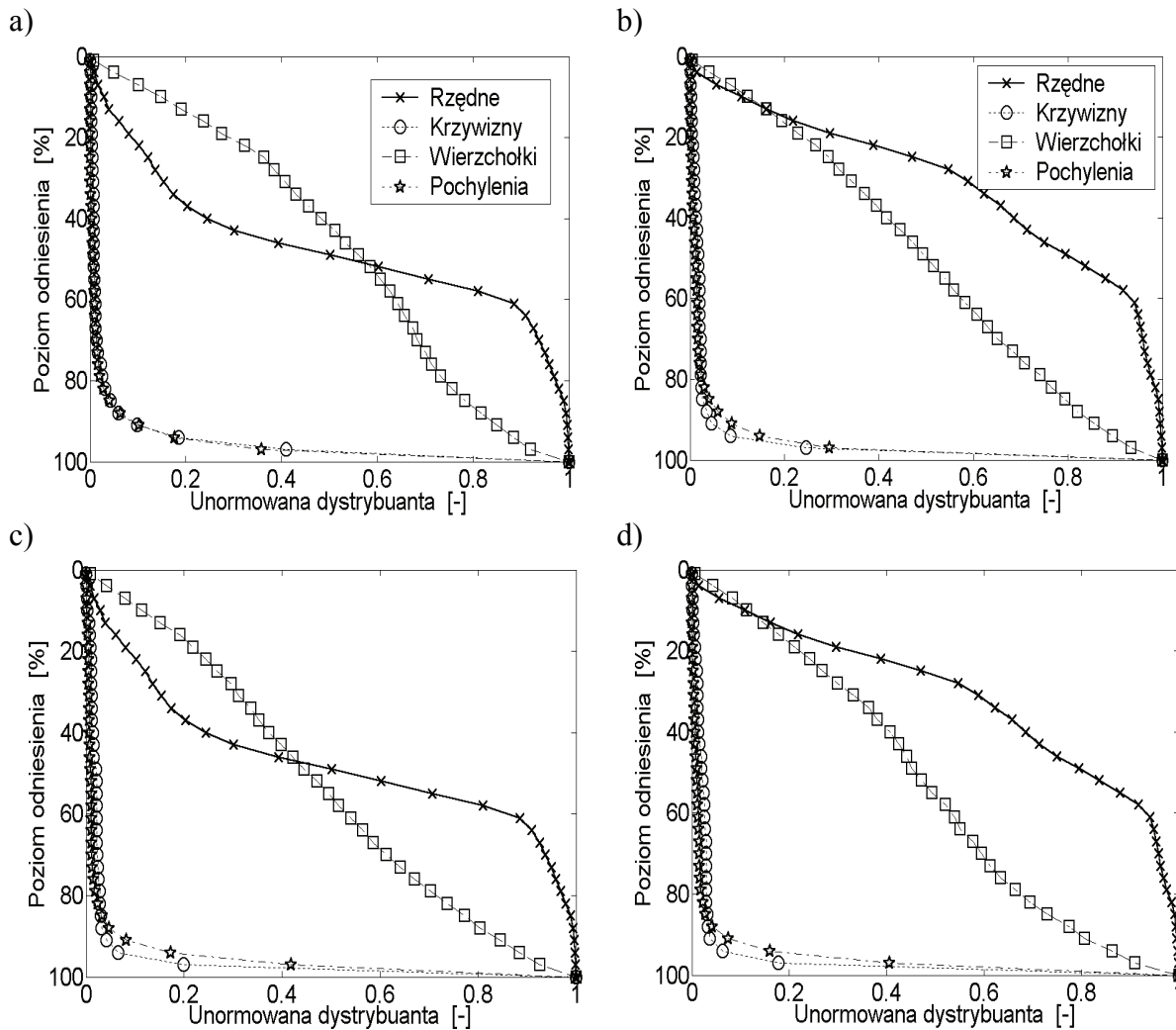
**Fig. 6.** Gęstość prawdopodobieństwa krzywizny szczytów boku zęba wychodzącego z obróbki frezowaniem obwiedniowym dla stopy (a) i głowy (b)



**Fig. 7.** Gęstość prawdopodobieństwa wysokości szczytów boku zęba wychodzącego z obróbki frezowaniem obwiedniowym dla stopy (a) i głowy (b)



**Fig. 8.** Gęstość prawdopodobieństwa pochylenia powierzchni boku zęba wychodzącego z obróbki frezowaniem obwiedniowym dla stopy (a) i głowy (b)



**Fig. 9.** Dystrybuanty gęstość prawdopodobieństwa: rzędnych profilu, krzywizny wierzchołków, wysokości wierzchołków, pochylenia profilu zarysu linii (a, b) i zarysu profilu (c, d) powierzchni boku zęba wychodzącego z obróbki dla: stopy (a, c) i głowy (b, d) zęba

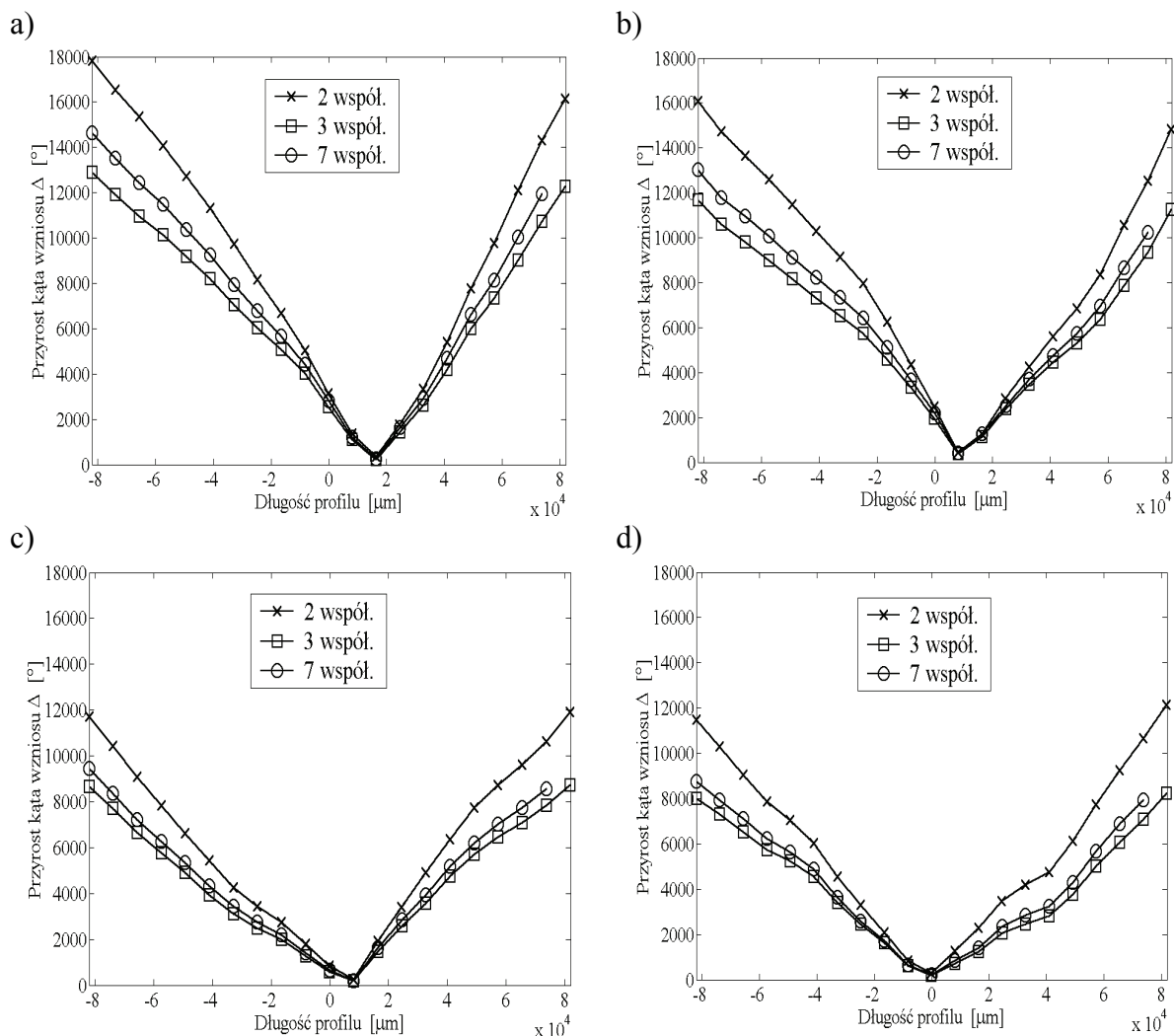
Unormowana powierzchniowa krzywa udziału materiałowego (dystrybuanta gęstości prawdopodobieństwa amplitud powierzchni) jest zbliżona dla głowy i stopy zębów frezowanych obwodniowo wychodzących z obróbki (rys. 5). Dotyczy to również unormowanych dystrybuant gęstość prawdopodobieństwa krzywizny szczytów (rys. 6) ich wysokości (rys. 7) oraz pochylenia analizowanych powierzchni (rys. 9). Wyjątkiem jest dystrybuanty gęstości prawdopodobieństwa rzędnych powierzchni głowy i stopy zęba frezowanego obwodniowo wchodzącego do obróbki (rys. 5). Jest ona korzystniejsza dla głowy zęba. Z analizy linii i zarysu zęba wynika natomiast, iż korzystniejszą krzywą udziału materiałowego ma głowa zęba w porównaniu z jej stopą (rys. 9).

Przyrost kąta pochylenia zarysu profilu jest korzystniejszy dla głowy zęba wychodzącego z obróbki (rys. 10). Z kolei przebieg wartości kąta pochylenia profilu linii zęba jest zbliżony dla jego głowy i stopy.

#### 4. WNIOSKI

Stwierdzono mniejszą wysokość nierówności i mniejsze ich odstępów dla powierzchni głowy w porównaniu z powierzchnią stopy zębów frezowanych obwodniowo kół zębatych walcowych. Większa wysokości nierówności powierzchni stopy zębów wynika z ich kształtowania częścią wierzchołkową ostrzy narzędzi zwykle o większym zużyciu tribolo-





**Fig. 10.** Przyrost kąta pochylenia zarysu profilu (a, b) i zarysu linii (c, d) boku zęba wychodzącego z obróbki frezowaniem obwiedniowym dla stopy (a, c) i głowy (b, d)

gicznym i o większym promieniu krawędzi skrawającej niż dla powierzchni bocznych frezu. Wynika to także z kinematyczno-geometrycznego odwzorowania przemieszczania ostrzy skrawających [4].

Powierzchnia boków zębów koła zębatego frezowaniu obwiedniowym jest ukierunkowana w małym stopniu.

Unormowane dystrybuanty gęstość prawdopodobieństwa: rzędnych powierzchni, krzywizny szczytów, wysokości szczytów, pochylenia powierzchni głowy i stopy zębów są zbliżone dla frezowania obwiedniowego boku zęba wychodzącego z obróbki. Stwierdzono jednak odmienny kształt krzywej udziału materiałowego stopy i głowy boku zęba wchodzącego do obróbki metodą frezowanego obwiedniowo.

Powierzchni głowy i stopy zębów frezowana obwiedniowo jest okresowo-losowa. Zarys profilu na wysokości zębów i zarys linii zębów wzdłuż ich szerokości po frezowaniu jest także okresowo-losowy.

## LITERATURA

- [1] Bouzakis K.-D., Lili E., Michalidis N., Fridericos O.: Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 57, no. 2, s. 676–696, 2008.

- [2] Dong W.P., Sullivan P.J., Stout K.J.: Comprehensive study of parameters for characterising 3-D surface topography. IV: Parameters for characterising spatial and hybrid properties, *Wear*, vol. 178, s. 45–60, 1994.
- [3] Dwyer-Joyce R., Hamer J.C., Hutchinso J.M., Ioannides E., Sayles R.S.: A pitting fatigue model for gear tooth surfaces, [In]: *Vehicle tribology*, (Eds.) D. Dowson, C.M. Taylor, M. Godet, Elsevier, Tribology series 18, s. 391–400, 1991.
- [4] Michalski J.: Surface topography of the cylindrical gear tooth flanks after hobbing and shaping Fellows method. *Pridneprovsky research journal* no. 10 (99), s. 125-141, 2009.
- [5] Naser Amini, Rosén B.-G., Westberg H.: Optimization of gear tooth surfaces. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* vol. 38, no. 5, s. 425–435, 1998.
- [6] Pawlus P.: *Topografia powierzchni: pomiar, analiza, oddziaływanie*. Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2005.
- [7] Xiao Li, Rosén B.-G., Naser Amini, Nilsson Per H.: A study on the effect of surface topography on rough friction in roller contact. *Wear*, vol. 254, s. 1162–1169, 2003.

### **SURFACE TOPOGRAPHY ANALYSIS OF HEAD AND ROOT TOOTH GEARS MADE BY HOBBING**

The article presents an analysis of three-dimensional topography of machined surface of the side teeth of cylindrical gears with separation of their head and root. Gear wheels were shaped by hobbing. Side surfaces of the teeth evaluated parameters and functions stereometry surface irregularities, surface orientation, surface autocorrelation function, power spectral density and the angular power spectrum density graphs, the cumulative power spectral density and arbitrary contour along the contour line profile and the tooth surface. A smaller height of surface irregularities and spacing of teeth in the side of the head are compared with root and its more favorable interest rate to the surface topography.