

**Jacek MICHALSKI, Paweł PAWLUS**

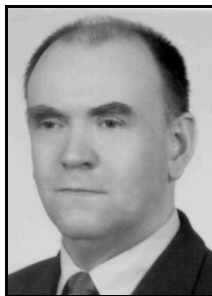
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA

## Analiza topografii przeciwległych powierzchni boków zęba koła zębatego frezowanego obwodniowo i dłutowanego metodą Fellowsa

Dr inż. Jacek MICHALSKI

Starszy wykładowca Zakładu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych. Dyscyplina: budowa i eksploatacja maszyn. Specjalność: technologia i eksploatacja pojazdów samochodowych. Zajmuje się technologią, metrologią techniczną i eksploatacją silników spalinowych, pojazdów i maszyn. Dorobek naukowy składa się z ponad 100 publikacji, w tym kilkunastu w renomowanych periodykach, oraz licznych prac dla przemysłu, projektów badawczych i patentów.

e-mail: [jmichals@prz.edu.pl](mailto:jmichals@prz.edu.pl)



Dr hab. inż. Paweł PAWLUS

Profesor nadzwyczajny Katedry Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji. Dyscyplina: budowa i eksploatacja maszyn. Specjalność: metrologia techniczna, tribologia. Zajmuje się metrologią chropowatości powierzchni oraz tarciami i zużyciem w układach tłok - pierścienie - cylinder silników spalinowych. Dorobek naukowy składa się z ponad 100 publikacji oraz licznych prac dla przemysłu i projektów badawczych.

e-mail: [ppawlus@prz.edu.pl](mailto:ppawlus@prz.edu.pl)



### Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę trójwymiarowej topografii powierzchni boków zęba kół zębatach walcowych wykonanych metodą frezowania obwodniowego i dłutowania metodą Fellowsa. Badania dotyczyły obrabianych powierzchni boków zęba, wychodzącej z obróbki i do niej wchodzącej. Topografię powierzchni boków zęba oceniono parametrami stereometrii powierzchni, powierzchniowymi funkcjami autokorelacji i widmowej gęstości mocy. Stwierdzono korzystniejsze ukształtowanie topografii powierzchni wychodzącej z obróbki w porównaniu z topografią boku zęba wchodzącego do obróbki.

**Słowa kluczowe:** koła zębata walcowe; frezowanie obwodniowe; dłutowanie metodą Fellowsa; topografia powierzchni boku zęba.

### Surface topography analysis of opposite flank tooth of cylindrical gears after hobbing and shaping by Fellows method

#### Abstract

The paper presents the analysis of 3D surface topography of teeth space flank of cylindrical gears after hobbing and shaping by Fellows method. Investigations concern the machined surface of a flank tooth, getting out and getting in to machining. The surface topography was measured by Talyscan 150 measuring equipment (Taylor Precision firm). The square sampling area of 2.56 mm x 2.56 mm was measured. The sampling interval in two perpendicular directions was 10  $\mu$ m. Form errors were eliminated by a polynomial of 8th degree. Figures 1, 2, 4 and 5 present pseudo-colour images of surface topographies, isometric views of surface topographies, the areal autocorrelation and power spectral density function. Figures 3 and 6 show angular plots of the areal power spectral density function, cross-correlation and autocorrelation functions as well as cumulated power spectral density graphs along the helix and tooth profile. The surface topography was assessed by parameters and functions of 3D surface topography (autocorrelation and power spectral density). It was found that surface topography features of teeth getting out from the machining were more profitable than of those getting in to the machining. Therefore teeth flanks created as getting out from the machining should be the active surface during operation.

**Keywords:** cylindrical gears wheel, hobbing, Fellows shaping, tooth surface topography space flank.

### 1. Wstęp

Topografia powierzchni boków zęba wykonana frezowaniem lub dłutowaniem metodą Fellowsa jest geometrycznie nieciągła. Kinetyka kształtowania powierzchni boków zęba w tych procesach charakteryzuje się bowiem przestrzennym i przerywanym w czasie stykiem ostrzy narzędzia z kołem zębatym. Znaczenie topografii powierzchni i dokładności boków zęba po frezowaniu obwodniowym i dłutowaniu metodą Fellowsa wzrasta. Ograniczeniu ulega szlifowanie, kształtujące często naprężenia własne rozciągające w warstwie wierzchniej. Coraz częściej koła zębata w stanie miękkim i twardym są tylko skrawane wiórowo lub dodatkowo wiórkowane lub gładzone gładzone bez szlifowania.

W pracy na podstawie dokonanej analizy trójwymiarowej topografii powierzchni bocznych zęba kół walcowych obrabianych metodą frezowania obwodniowego i dłutowania metodą Fellowsa stwierdzono, że powierzchnią czynną przekładni walcowej z tak obrabianymi kołami powinny być boki zębów wychodzące z obróbki.

### 2. Warunki badań

Półfabrykaty kół wykonano metodą kucia matrycowego. Materiałem była stal stopowa niskowęglowa do nawęglania gatunku AMS 6265. Otoczki kół ulepszano cieplnie do twardości 35–41 HRC. Koła walcowe o zębach prostych miały dwa wieńce o szerokości 6,3 mm i 5,1 mm i module 1,814 mm. Wieniec zębata o średnicy podziałowej 88,90 mm dłutowano metodą Fellowsa. Drugi wieniec zębata o średnicy podziałowej 156,03 mm frezowano obwodniowo przeciwbieżnie bez posuwu wzdłużnego osi frezu. Obróbkę przeprowadzono frezarką obwodniową Pfauter PE 300. Stosowano monolityczny jednokrotny frez prawozwojny ze stali ASP 2040 o średnicy 70 mm i 14 rowkach wiórowych produkcji firmy Lorenz. Powierzchnia przyłożenia oraz powierzchnia natarcia ostrzy frezu była pokryta warstwą azotku tytanu. Stosowano konwencjonalną umiarkowaną prędkość obwodową frezu 40 m/min, posuw wzdłużny 2 mm/obrót koła oraz dwa przejścia o głębokości wcięcia 3,7 mm i 0,1 mm. Chłodziwem był olej maszynowy 30. Frez zapewniał podcięcie u podstawy (protuberancje) zarysu profilu boków zębów.

Dłutowanie metodą Fellowsa przeprowadzono w trzech przejściach obrabiarką Lorenz LS 186 CNC. Dłutak firmy Lorenz, rodzaju garkowego wykonany ze stali ASP2030 i pokryty warstwą azotku tytanu miał liczbę zębów 56. Stosowano metodę posuwu wgłębnego z posuwem obrotowym, o głębokości wcięcia 3,4, 0,5 i 0,1 mm. Posuw wgłębny wynosił 0,003 mm/podwójny skok dłutaka oraz posuw obrotowy odpowiednio dla trzech przejść 0,285, 0,228 i 0,104 mm/podwójny skok narzędzia. Liczba podwójnych skoków narzędzia na podziałkę pomiędzy sąsiednimi zębami wynosiła więc 20, 25 i 55. Prędkość ruchu posuwistozwrotnego narzędzia wynosiła odpowiednio 20, 25 i 30 m/min. Płynem obróbkowym był olej Ferrocol EB.

Przeprowadzono pomiar topografii powierzchni zębów kół zębatach w połowie ich szerokości. Stosowano profilometr stykowy trójwymiarowy Talyscan 150 firmy Taylor Hobson. Dla boków zęba wychodzących i wchodzących z obróbki kwadratowy obszar pomiaru miał długość boku 2,56 mm. Otrzymano 65536 punktów pomiarowych (256 linii). Krok próbkowania i odstęp ścieżek pomiarowych wynosił 10  $\mu$ m. Prędkość skanowania w każdym przypadku wynosiła 2 mm/s. Końcówka pomiarowa stosowanego profilometru była stożkowa o kącie wierzchołkowym 90° zakończona powierzchnią kulistą o promieniu 2,5  $\mu$ m. Obliczenia parametrów topografii powierzchni przeprowadzono programem Mountains Map Universal firmy Digital Surf i oprogramowaniem własnym. Powierzchnię skojarzoną boków zęba opisano wielo-

mianem 8 stopnia dwu zmiennych. Najkrótsze długości fali, określone punktem największej krzywizny aproksymowanej funkcji powierzchniowej gęstości widmowej mocy kątowej skumulowanej  $SP(1/f_x)$ ,  $SP(1/f_y)$  [1], wynoszą po frezowaniu obwodniowym 111  $\mu\text{m}$  i dłutowaniu 62  $\mu\text{m}$  (tab. 1).

Wysokość topografii powierzchni boków zęba określono średnim arytmetycznym  $SPa$  i średnim kwadratowym  $SPq$  odchyleniem wysokości powierzchni, całkowitą wysokością nierówności powierzchni  $SPt$  oraz średnią kwadratową wysokością szczytów nierówności  $SPqsum$ . Identyfikowano szczyty powierzchni z 8 przyległych punktów pomiarowych w węzłach siatki pomiarowej kwadratowej. Średnią krzywiznę szczytów  $SPsc$  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 pochyłeń prostopadłych profili z 7 współrzędnych. Wyznaczono wartości powierzchniowe: objętości materiału  $SPmmr$ , objętość pustek głębokich wgłębień  $SPmvr$ , wskaźnik gromadzenia środka smarnego we wgłębieniach  $SPvi$  i wskaźnik gromadzenia środka smarnego w rdzeniu  $SPci$ . Odstępy nierówności charakteryzowano wartościami powierzchniowymi: długością korelacji  $SPal$ , długością fali koła zębatego wzdłuż szerokości  $SP(1/f_x)$  i na wysokości zębów  $SP(1/f_y)$ , wyznaczonych punktem największej krzywizny aproksymowanej gęstości widmowej mocy skumulowanej. W pracy wyznaczono także średnie arytmetyczne  $SP\Delta a$  i średnie kwadratowe pochylenie powierzchni  $SP\Delta q$ . Dla linii zębów oznaczono go  $SP\Delta ax$ , zaś dla profilu zębów na wysokości  $SP\Delta ay$ .

Wzięto także pod uwagę inne parametry kształtu: współczynnik rozwinięcia  $SPdr$ , gęstość szczytów  $SPds$ , średnią arytmetyczną krzywiznę szczytów  $SPsc$  (oznaczoną dla linii zębów  $SPscx$  oraz dla profilu zębów  $SPscy$ ) oraz wymiar fraktalny  $SPfd$ . Rozkład rzędnych powierzchni określono współczynnikami asymetrii  $SPsk$  oraz nachylenia  $SPku$ . Opis charakterystyki krzywej udziału materiałowego powierzchni metodą sieciowej zawierał: zredukowaną głębokość wzniesień  $SPpk$ , zredukowaną głębokość wgłębień  $SPvk$ , głębokość rdzenia  $SPk$  oraz udział materiałowy wzniesień  $SPr1$  i udział materiałowy wgłębień  $SPr2$ .

Opis krzywej udziału materiałowego powierzchni metodą dystrybuanty udziału materiałowego zawiera wartości: odchylenia standardowego wysokości składowej losowej powierzchni, która charakteryzuje jej część wierzchołkową  $SPpq$ , odchylenie standardowe wzniesień  $SPvq$  i względny udział materiałowy wyodrębnienia wzniesień od wgłębień  $SPmq$ . Aproksymowaną unormowaną krzywą udziału materiałowego opisano: pochyleniem w punkcie przegięcia  $dp1$  i rzędną tego punktu  $ypp$  [2]. Teksturę oceniono wartościami wskaźnika tekstury powierzchni  $SPtr$  i wskaźnika izotropowości  $SPiso$ . Z uwagi na dużą zmienność wartości kierunku struktury powierzchni  $SPtd$ , w pracy nie zamieszczono jego wartości. Analizowano także mapy kątowe funkcji odwzorowania amplitud metodą spektralną i korelacji [4]. Sporządzono także mapy szarości, widoki izometryczne, wykresy funkcji autokorelacji i skumulowanej gęstości widmowej mocy. Analizowano topografie powierzchni 12 kół zębatych.

### 3. Wyniki badań i ich analiza

Po frezowaniu obwodniowym i dłutowaniu metodą Fellowsa bok zęba wychodzący z obróbki ma mniejszą wysokość nierówności powierzchni ( $SPa$ ,  $Sq$  i  $SPt$ ), aniżeli bok do niej wchodzący (tab.1). Podobnie jest z odstępami nierówności, o czym świadczy długość funkcji autokorelacji  $SPal$  i długości charakterystycznych fal  $SP(1/f_x)$  i  $SP(1/f_y)$ . O korzystniejszych cechach nierówności powierzchni boku zęba wychodzącego z obróbki decyduje także mniejsze pochylenie  $SP\Delta q$  i większa krzywizna szczytów  $SPsc$ . Potwierdzają to także mniejsze wartości parametrów pochylenia zarysu linii i profilu zęba  $SP\Delta ax$ ,  $SP\Delta ay$  oraz większe krzywizny wierzchołków tych profili  $SPscx$ ,  $SPscy$ . Również potwierdza to mniejsza wartość średnia objętość materiału nierówności powierzchni  $SPmmr$  i mniejsza wartość objętości pustek  $SPmvr$ . Odmienność topografii tych powierzchni wynika także z wartości

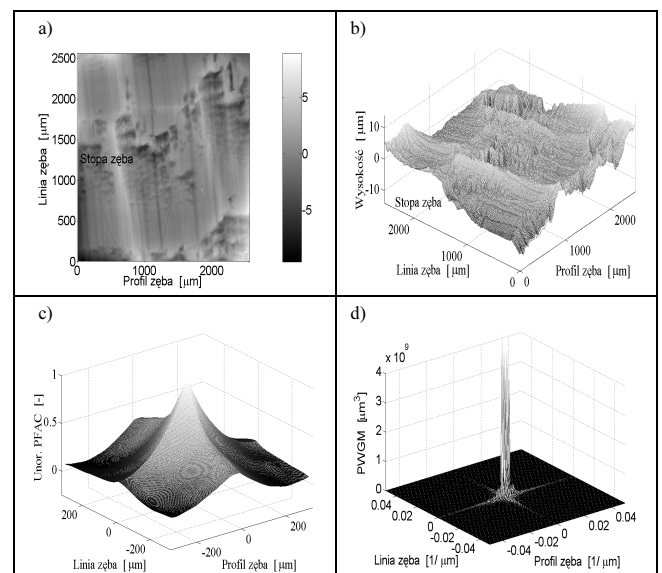
wymiaru fraktalnego  $SPfd$ . Ma on większe wartości dla powierzchni wychodzącej z obróbki.

Tab. 1. Parametry i funkcje topografii powierzchni bocznych zęba koła frezowanego i dłutowanego metodą Fellowsa

Tab.1. Surface topography parameters of hobbed and Fellows gear shaping tooth flanks

Parametry	Frezowanie obwodniowe		Dłutowanie metodą Fellowsa	
	Bok wchodzący do obróbki	Bok wychodzący z obróbki	Bok wchodzący do obróbki	Bok wychodzący z obróbki
$SPa$ ( $\mu\text{m}$ )	5,22	3,85	1,85	1,34
$SPq$ ( $\mu\text{m}$ )	6,18	4,59	2,41	1,70
$SPt$ ( $\mu\text{m}$ )	35,21	25,06	16,52	10,66
$SPsk$ (-)	-0,13	0,02	1,20	-0,01
$SPku$ (-)	2,35	2,28	4,42	3,16
$SPmmr$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ )	0,0196	0,0148	0,0082	0,0080
$SPmvr$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2$ )	0,0222	0,0171	0,0172	0,0056
$SPds$ (szczytów/ $\text{mm}^2$ )	744	714	1888	1393
$SPtr$ (-)	0,40	0,47	0,86	0,28
$SPal$ ( $\mu\text{m}$ )	630	394	509	369
$SPiso$ (%)	40	47	86	28
$SPfd$ (-)	2,04	2,11	2,15	2,16
$SP\Delta q$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0658	0,0641	0,0415	0,0381
$SPsc$ ( $1/\mu\text{m}$ )	0,0110	0,0093	0,0090	0,0086
$SPdr$ (%)	0,210	0,20	0,086	0,072
$SPbi$ (-)	0,70	0,56	0,33	0,90
$SPci$ (-)	1,36	1,62	2,06	1,57
$SPvi$ (-)	0,10	0,08	0,07	0,14
$SP(1/f_x)$ ( $\mu\text{m}$ )	380	111	182	133
$SP(1/f_y)$ ( $\mu\text{m}$ )	333	133	111	62
$SP\Delta ax$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0218	0,0208	0,0075	0,0049
$SP\Delta ay$ ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	0,0307	0,0286	0,0176	0,0157
$SPqsum$ ( $\mu\text{m}$ )	0,11	0,11	0,29	0,43
$SPscx$ ( $1/\mu\text{m}$ )	0,0046	0,0038	0,0020	0,0013
$SPscy$ ( $1/\mu\text{m}$ )	0,0049	0,0043	0,0036	0,0032
$SPpq/SPt$ (-)	0,18	0,12	0,23	0,11
$SPvq/SPt$ (-)	0,13	0,19	0,12	0,21
$SPmq$ (-)	0,05	0,83	0,06	0,75
$SPpk/SPt$ (-)	0,31	0,23	0,22	0,17
$SPvk/SPt$ (-)	0,22	0,23	0,29	0,24
$SPk/SPt$ (-)	0,13	0,18	0,10	0,18
$SPr1$ (-)	0,12	0,10	0,11	0,08
$SPr2$ (-)	0,82	0,81	0,80	0,81
$dp1$ (-)	0,11	0,16	0,08	0,16
$ypp$ (-)	0,48	0,55	0,50	0,63

x - kierunek linii zęba, y - kierunek profilu zęba



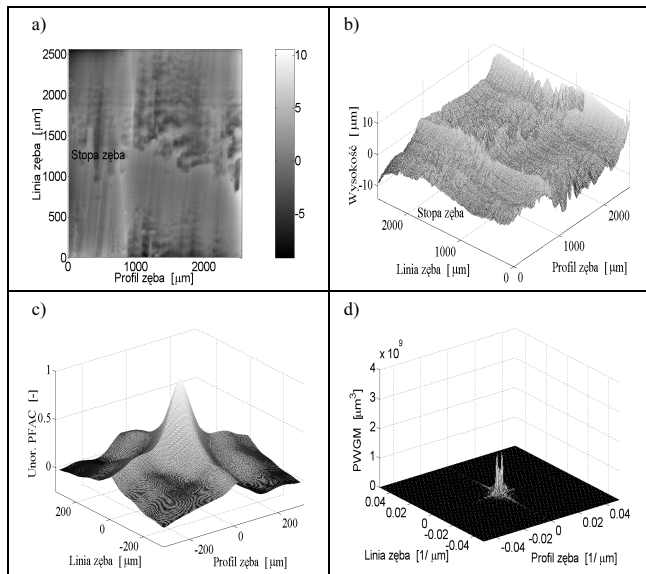
Rys. 1. Mapa szarości topografii powierzchni (a), widok izometryczny (b), powierzchniowa funkcja autokorelacji (c), powierzchniowa widmowa gęstość mocy (d) boku zęba koła zębatego walcowego frezowanego obwodniowo wchodzącego do obróbki skrawaniem

Fig. 1. Pseudo-colour image (a), isometric view (b), areal autocorrelation function (c), areal power spectral density function (d) of tooth flank getting in to machining surface topography after hobbing of cylindrical gear wheel

Z kolei mniej korzystne cechy geometryczne powierzchni boku zęba wchodzącego do obróbki potwierdza jego większa wartość po-

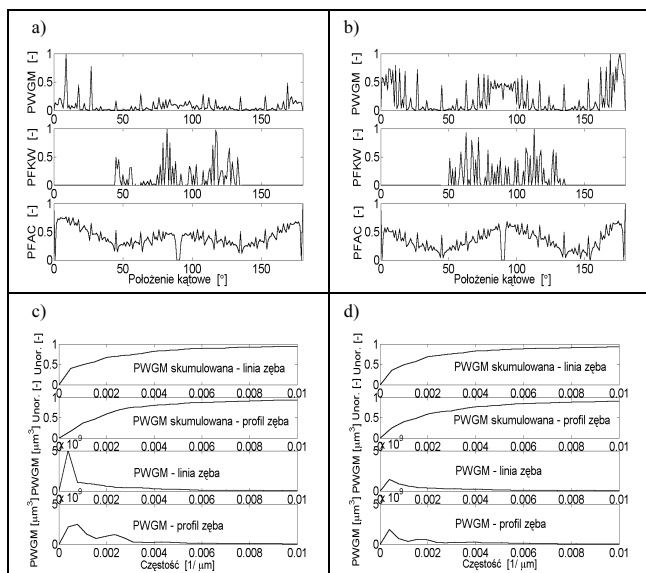
wierzchniowej widmowej gęstości mocy. Wynika to z większego zużycia tribologicznego odpowiednich krawędzi ostrzy frezu i dłutaka oraz kierunku spływu wiórów, które uszkadzają tę powierzchnię.

Izotropowość boku zęba wchodzącego do obróbki jest szczególnie duża dla dłutowania metodą Fellowsa. Ocena wynika z wartości wskaźnika tekstury powierzchni  $SPtr$  oraz wskaźnika izotropowości  $SPiso$ . Potwierdzają to także wyniki badań wysokości nierówności, odstępów, krzywizny oraz skumulowanej gęstości widmowej mocy dla zarysu linii i profilu zęba (rys. 3, 6). Powierzchnie boków zęba po dłutowaniu są bardziej anizotropowe niż po frezowaniu obwiedniowym.



Rys. 2. Mapa szarości topografii powierzchni (a), widok izometryczny (b), powierzchniowa funkcja autokorelacji (c), powierzchniowa widmowa gęstość mocy (d) boku zęba koła zębatego walcowego frezowanego obwiedniowo wychodzącego z obróbki skrawaniem

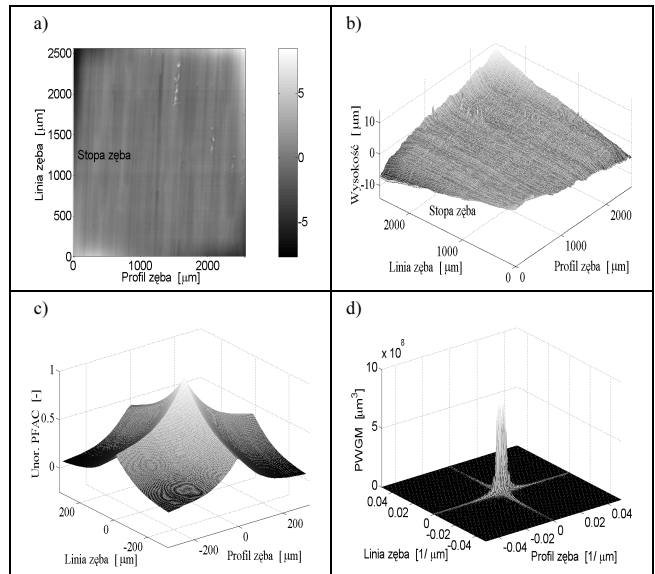
Fig. 2. Pseudo-colour image (a), isometric view (b), areal autocorrelation function (c), areal power spectral density function (d) of tooth flank getting out from machining surface topography after hobbing cylindrical gear wheel



Rys. 3. Charakterystyka powierzchni wchodzącego (a), (c) i wychodzącego (b), (d) boku zęba koła zębatego walcowego frezowanego metodą obwiedniową:

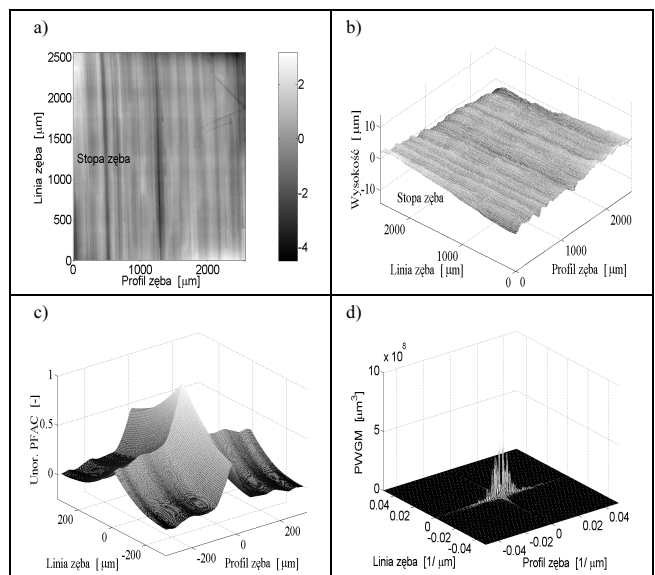
Fig. 3. Cumulated and arbitrary power spectral density functions along helix and tooth profile of space flank getting out to machining (a), (c) and space flank getting out from machining (b), (d), angular plots of power spectral density (PWGM), cross correlation function (PFKW), auto correlation function (PFAC) (a), (b) of a hobbed cylindrical gear wheel

Krzywa udziału materiałowego na podstawie opisu metodą siecznej (parametry  $SPpk$ ,  $SPvk$ ,  $SPk$ ,  $SPr1$  i  $SPr2$ ) wskazuje na korzystniejsze ukształtowanie powierzchni boku zęba wychodzącego z obróbki aniżeli do niego wchodzącego. Dotyczy to zarówno frezowania obwiedniowego jak i dłutowania metodą Fellowsa. Mniejsze są bowiem głębokości zredukowane i względne wzniesień  $SPpk$ , większe natomiast głębokości rdzenia  $SPk$  oraz zbliżone lub nieco mniejsze głębokości zredukowane wgłębień  $SPvk$ . Potwierdzają to parametry krzywej udziału materiałowego w układzie gęstości prawdopodobieństwa. Odchylenia standardowe wzniesień nierówności powierzchni wychodzącej z obróbki  $SPpq$  są odpowiednio mniejsze niż boku zęba wchodzącego do obróbki.



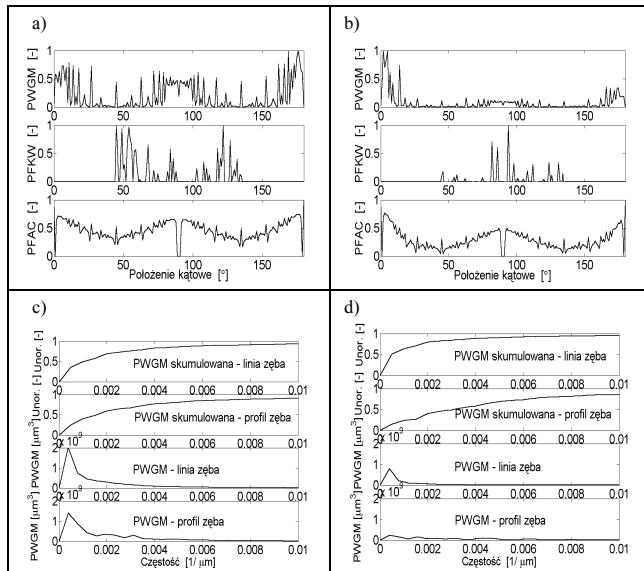
Rys. 4. Mapa szarości topografii powierzchni (a), widok izometryczny (b), powierzchniowa funkcja autokorelacji (c), powierzchniowa widmowa gęstość mocy (d) boku zęba koła zębatego walcowego dłutowanego metodą Fellowsa wchodzącego do obróbki skrawaniem

Fig. 4. Pseudo-colour image (a), isometric view (b), areal autocorrelation function (c), areal power spectral density function (d) of tooth flank getting out to machining surface topography after Fellows shaping of cylindrical gear wheel



Rys. 5. Mapa szarości topografii powierzchni (a), widok izometryczny (b), powierzchniowa funkcja autokorelacji (c), powierzchniowa widmowa gęstość mocy (d) boku zęba koła zębatego walcowego dłutowanego metodą Fellowsa wychodzącego z obróbki skrawaniem

Fig. 5. Pseudo-colour image (a), isometric view (b), areal autocorrelation function (c), areal power spectral density function (d) of tooth flank getting out from machining surface topography after Fellows shaping of cylindrical gear wheel



Rys. 6. Charakterystyka powierzchni wchodzącego (a), (c) i wychodzącego (b), (d) boku zęba koła zębatego walcowego dłutowanego metodą Fellowsa: (a), (b) kątowna gęstość widmowa mocy (PWGM), funkcja korelacji wzajemnej (PFKW) i funkcja autokorelacji (PFAC), gęstość widmowa mocy skumulowana i arbitralna wzdłuż linii i profilu zęba (c), (d)

Fig. 6. Cumulated and arbitrary power spectral density functions along helix and tooth profile of space flank getting in to machining (a), (c) and space flank getting out from machining (b), (d) angular plots of power spectral density (PWGM), cross correlation function (PFKW), auto correlation function (PFAC) (a), (b) of a hobbed cylindrical gear wheel

Z kolei odchylenia standardowe wgłębień  $SP_{vq}$  są wyraźnie większe dla boku zęba wychodzącego z obróbki. Zdecydowanie większe wartości ma także udział materiałowy  $SP_{mq}$  dla tej powierzchni boku zęba. Te cechy krzywej udziału materiałowego potwierdza jej opis aproksymowaną trzyparametrową funkcją [2].

Pochylenie unormowanej krzywej udziału materiałowego w punkcie przegięcia  $dp1$  jest większe dla powierzchni wychodzącej z obróbki. Rzędna tego punktu  $ypp$  jest odpowiednio większa dla tej powierzchni boku zęba. Rzędna ta jest zbliżona do położenia mody gęstości rozkładu rzędnych powierzchni. Stwierdzone właściwości powierzchni boków zęba w pełni potwierdzają wartości współczynników asymetrii powierzchni  $SP_{sk}$  i jej nachylenia  $SP_{ku}$ .

Funkcja gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni (rys. 1, 2, 4, 5) wskazuje na silne ukierunkowanie struktury geometrycznej powierzchni wzdłuż linii zęba dłutowanego metodą Fellowsa oraz zarysu profilu zęba frezowanego obwodniowo. Obrazy widmowej gęstości mocy są obrócone o  $90^\circ$  w stosunku do ukierunkowania powierzchni. Powierzchniowa funkcja autokorelacji jest ukierunkowana zgodnie z ukierunkowaniem śladów obróbki na powierzchni boku zęba. Nielikni udział w mocy widma mają nierówności powierzchni boku zęba o małych długościach fal, bardzo duży z kolei mają fale o dużych długościach.

Nierówności linii zęba są typowo okresowe podczas obróbki frezem jednozwojowym z dużym posuwem na obrót 2 mm/obr. Nierówności linii zęba są z kolei typowo losowe podczas obróbki frezem trzyzwojowym z małym posuwem na obrót [3]. Powierzchniowa funkcja autokorelacji (rys. 1, 2, 4, 5) wskazuje, że powierzchnie boków zęba frezowanych obwodniowo i dłutowanych metodą Fellowsa są okresowo-losowe (quasi-okresowe). Rysunki 3 i 6 pozwalają stwierdzić, że miarą ukierunkowania jest położenie kątowne wartości średniej widma kątownego gęstości widmowej mocy, a nie położenie kątowne jego wartości modalnej. Quasi-okresowość powierzchni obrabianych boków zęba, zwłaszcza o dużych długościach korelacji w kierunku profilu i linii zęba, uniemożliwia określenie ich ukierunkowania za pomocą wykresu kątownego powierzchniowej funkcji autokorelacji. Potwierdza to stanowisko Whitehouse'a [4], że funkcja autokorelacji jest mało

przydatna do oceny powierzchni zdeterminowanych. Wykresy kątowne gęstości widmowej mocy i funkcji autokorelacji przedstawiają zarówno charakterystyczne ukierunkowanie jak i charakterystykę tła.

Spektra kątowne gęstości widmowej mocy (rys. 3, 6) poprawnie charakteryzują ukierunkowanie powierzchni boków zęba. Spektra te są skorelowane z oceną za pomocą wskaźnika tekstury powierzchni  $SP_{tr}$  i wskaźnika izotropowości  $SP_{iso}$  (tab. 1). Zauważyć można również niepoprawną charakterystykę ukierunkowania powierzchni za pomocą funkcji korelacji wzajemnej. Ma to miejsce, gdy ukierunkowanie powierzchni jest zbliżone do kierunku analizowanych profili tj. równoległych do linii zęba. Jednocześnie funkcja korelacji wzajemnej bardzo silnie wyodrębnia drobne cechy geometryczne powierzchni na podstawie tylko pomiaru kilku równoległych profili. Znajduje to zastosowanie w analizie szkod i wad powierzchni. Zbliżoną ocenę ukierunkowania zapewnia powierzchniowa funkcja widmowej gęstości mocy i powierzchniowa funkcja autokorelacji, ze wskazaniem na pierwszą.

#### 4. Wnioski

Topografię powierzchni boku zębów frezowanych obwodniowego i dłutowanych metodą Fellowsa można ocenić parametrami i funkcjami stereometrii powierzchni. Stwierdzono dużą przydatność powierzchniowej gęstości widmowej mocy do oceny ukierunkowania struktury geometrycznej powierzchni. Dotyczy to zarówno wykresu kątownego jak i funkcji gęstości widmowej. Prognozowane ukierunkowanie powierzchni jest zbliżone do położenia kątownego średniej wartości widma kątownego powierzchniowej funkcji gęstości widmowej mocy. Funkcja korelacji wzajemnej i jej spektrum kątowne mają małą przydatność do oceny topografii powierzchni, gdy kierunek zmierzonych równoległych profili jest zbliżony do ukierunkowania powierzchni.

Powierzchnia boków zęba koła zębatego dłutowanego metodą Fellowsa jest anizotropowa i silnie ukierunkowana wzdłuż linii zębów. Ukierunkowanie powierzchni boków zęba po frezowaniu obwodniowym jest zdecydowanie mniejsze.

Krzywa udziału materiałowego jest korzystniejsza dla powierzchni boków zęba (frezowanego obwodniowo i dłutowanego metodą Fellowsa) wychodzących z obróbki w porównaniu z powierzchniami boków zęba wchodzącymi do obróbki. Dotyczy to także wysokości i krzywizn szczytów oraz ich pochylenia. Szczególnie duże różnice tych cech stwierdzono dla boków zęba dłutowanego metodą Fellowsa.

Przedstawione cechy powierzchni bocznych zębów sprawiają, że boki czynne eksploatowanych kół zębatych walcowych, zwłaszcza dłutowane wykończeniowo metodą Fellowsa, są zwykle wykonane jako boki wychodzące z obróbki.

#### 5. Literatura

- [1] P. Pawlus: Digitisation of surface topography measurement results. Measurement vol. 40, p. 672–686, 2007.
- [2] J. Michalski, P. Pawlus: Description of honed cylinders surface topography. Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 34, no. 2, p. 199–210, 1994.
- [3] J. Michalski, P. Pawlus, A. Dzierwa: Surface topography of teeth of cylindrical gears After hobbing. Acta Mechanica Slovaca, vol. 4–C, no. 11, p. 146–158, 2007.
- [4] D.J. Whitehouse: Handbook of surface metrology. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 1994.