

Stanisław PŁONKA¹, Jan SZADKOWSKI¹, Józef MATUSZEK², Paweł KOBIELA³

ROZWÓJ WYBRANYCH METOD KSZTAŁTOWANIA OBRÓBKĄ SKRAWANIEM UZĘBIEŃ KÓŁ ZĘBATYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono nieco rozszerzone podejście do klasyfikacji narzędzi skrawających. Podano przykłady narzędzi sklasyfikowanych do poszczególnych grup. Scharakteryzowano obszary zastosowań sterowanych numerycznie obrabiarek do obróbki uzębień. Przedstawiono wyniki własnych badań procesu szlifowania kształtowego kół zębatach walcowych o zębach śrubowych na szlifierce Rapid 900 firmy HOEFLER. Podano krótki opis obrabiarki i wyniki badań dokładności geometrycznej i chropowatości powierzchni zębów obrobionych tą metodą. Pokazano przykład rozwoju metod uzyskiwania ewolwenty sferycznej w uzębieniach kół stożkowych na podstawie literatury – od strugania kopiowego wg wzornika na starych obrabiarkach do kół o dużych modułach do obróbki uzębień krzywoliniowych o złożonych kształtach narzędziami punktowymi na frezarkach CNC sterowanych w 3 lub 4 osiach.

Słowa kluczowe: Obróbka kół zębatach, metody kształtowe obróbki, dokładność i chropowatość powierzchni.

SELECTED GEARS CUTTING METHODS DEVELOPMENT

Summary. The paper presents a somewhat extended approach to the cutting tools classification. After that authors present results of the research concerning the form – grinding of spur gears with helical teeth. The modern gear – grinding machine Rapid 900 of HOEFLER is described and results of the accuracy and surface roughness researches are given. Then an example is given, based on references, of the bevel spherical involute, gears cutting, illustrating the development from the cutting of very large straight bevel gears based on the double tracing method suitable for old template – type bevel gear planers to the modern approach using CNC milling machine (3 or 4axis controlled, the principle of Free Form Surfaces cutting).

Key words: Gear machining, form processing methods, accuracy and surface roughness.

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji

² Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Inżynierii Produkcji

³ Fabryka Reduktorów i Motoreduktorów BEFARED sp. z o.o. w Bielsku-Białej

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono najpierw pewne nieco rozszerzone podejście do klasyfikacji narzędzi skrawających, następnie omówiono krótko szlifowanie uzębień walcowych metodą kształtowo-podziałową na szlifierkach CNC wraz z wybranymi wynikami badań własnych dotyczącymi dokładności obróbki.

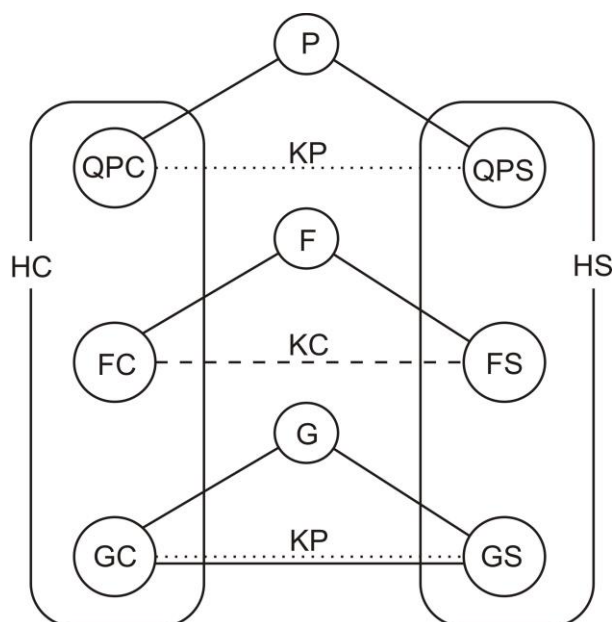
W dalszej kolejności pokazano rozwój metod kształtowania uzębień stożkowych odpowiadających ewolucji sferycznej od obróbki skrawaniem na konwencjonalnych strugarkach pracujących na zasadzie kopiowania do obróbki na frezarkach CNC (na zasadzie obróbki powierzchni o dowolnym kształcie (Free Form Surfaces) narzędziem punktowym).

2. NARZĘDZIA SKRAWAJĄCE KSZTAŁTUJĄCE LINIĄ I KSZTAŁTUJĄCE POWIERZCHNIĄ

Mówiąc o kształtowaniu powierzchni obróbką skrawaniem, należy brać pod uwagę nie tylko wyidealizowaną nominalną powierzchnię, będącą zwykle formą stosunkowo prostą, ale należy również uwzględnić powierzchnię quasi-rzeczywistą, co oznacza wzięcie pod uwagę także pewnych aspektów jakości tej powierzchni (zwłaszcza jej chropowatości oraz odchyłek kształtu).

Wykorzystując bardzo rozległą wiedzę zawartą w klasycznych dziełach dotyczących narzędzi skrawających, a zwłaszcza w pracach [2, 3], autorzy pragną przedstawić pewną syntezę zagadnień klasyfikacji narzędzi, pokazaną na rysunku 1. Jest ona wynikiem ewolucji punktu widzenia przedstawionego w pracy [6]. Rysunek 1 pokazuje, w postaci hipergrafu, podział narzędzi na punktowe P, kształtowe F oraz obwiedniowe G, z uwzględnieniem dodatkowo podziału na narzędzia kształtujące linią i kształtujące powierzchnią.

W przypadku narzędzi punktowych należy uwzględnić ich specyficzne właściwości związane zarówno z tworzeniem powierzchni quasi-rzeczywistej, jak i z programowaniem obróbki. W pierwszym przypadku wiąże się to z geometrycznym odwzorowaniem krawędzi skrawającej w pobliżu jej punktowego styku z nominalną powierzchnią obrobioną, a w drugim – z wnoszeniem do programu poprawek związanych z kształtem i wymiarami naroża krawędzi skrawającej albo z kształtem i wymiarami powierzchni działania narzędzia. Prowadzi to do podziału narzędzi punktowych na quasi-punktowe kształtujące linią (krzywą) QPC oraz na quasi-punktowe kształtujące powierzchnią QPS. Do narzędzi QPC należą noże tokarskie i wiertła, do QPC – m.in. frezy i ściernice do obróbki powierzchni krzywoliniowych. W grupie narzędzi kształtowych bardzo ważny jest ich podział na dwie podgrupy, podkreślany zwłaszcza w pracach Profesora S. Kunstettera (obróbka kształtowa I i II). W pierwszym przypadku narzędzie FC kształtuje powierzchnię obrobioną (nominalną) linią – jest to przypadek noża kształtowego promieniowego (o konstrukcji słupkowej albo krążkowej). W drugim – narzędzie FS kształtuje tę powierzchnię powierzchnią styczną do niej, czyli powierzchnią działania narzędzia (w pierwszym przypadku powierzchnią działania narzędzia jest powierzchnia obrobiona). Jest to przypadek noża kształtowego stycznego albo freza kształtowego. Kontakt krawędzi skrawającej narzędzia FC z powierzchnią obrobioną jest liniowy, kontakt powierzchni działania narzędzia FS z tą powierzchnią jest również liniowy. W przypadku kształtowania powierzchni narzędziem FS powierzchnia obrobiona powstaje jako obwiednia położenia powierzchni działania narzędzia.



Rys. 1. Hipergraf pokazujący podział narzędzi skrawających na punktowe P, kształtowe F oraz obwiedniowe G. Krawędzie pomiędzy parami wierzchołków pokazują: podziały na podgrupy (linie ciągłe: QPC narzędzia quasi-punktowe kształtujące linię i QPS – kształtujące powierzchnię, podobnie – FC i FS – narzędzia kształtowe kształtujące kolejno linię i powierzchnię oraz GC i GS – obwiedniowe kształtujące linię i powierzchnię), charakter kontaktu krawędzi skrawającej lub powierzchni działania narzędzia z powierzchnią obróbką (linia punktowa – kontakt punktowy KP, linia przerywana – kontakt liniowy KC). Hiperkrawędzie (QPC, FC, GC)=HC i (QPS, FS, GS)=HS eksponują możliwości podziału narzędzi skrawających na kształtujące linię i kształtujące powierzchnię

Fig. 1. Hypergraph presenting the division of cutting tools on the point P, profile F and envelope G grinding tools. Edges between pairs of apexes show: division into subgroups (solid lines: QPC quasi-point line shaping tools and QPS – surface shaping tools, similarly – FC and FS – profile tools sequentially line and surface shaping, and the GC and GS – generation grinding line and surface shaping), the nature of the contact of surface of the cutting edge or surface of operation of the tool with the machined surface (dotted line – KP point contact, broken line – line contact KC). Hyperedges (QPC, FC, GC) = HC and (QPS, FS, GS) = HS emphasize the possibility of division of cutting tools for line shaping and surface shaping

Narzędzia obwiedniowe można również podzielić na kształtujące linię GC (np. toczenie obwiedniowe powierzchni obrotowej) i kształtujące powierzchnię GS (np. dłutowanie i struganie oraz frezowanie obwiedniowe uzębień). Obróbka obwiedniowa wiąże się ze stosowaniem obrabiarek obwiedniowych, które w wykonaniu konwencjonalnym są wyposażone w łańcuchy kinematyczne zapewniające ruch odtaczania. Współczesne obrabiarki ze sterowaniem komputerowym (CNC) realizują powiązania ruchów zespołów obrabiarki odpowiadające odtaczaniu przez oprogramowanie. W ten sposób następuje odwzorowanie centroid albo aksoid, charakterystyczne dla obróbki obwiedniowej.

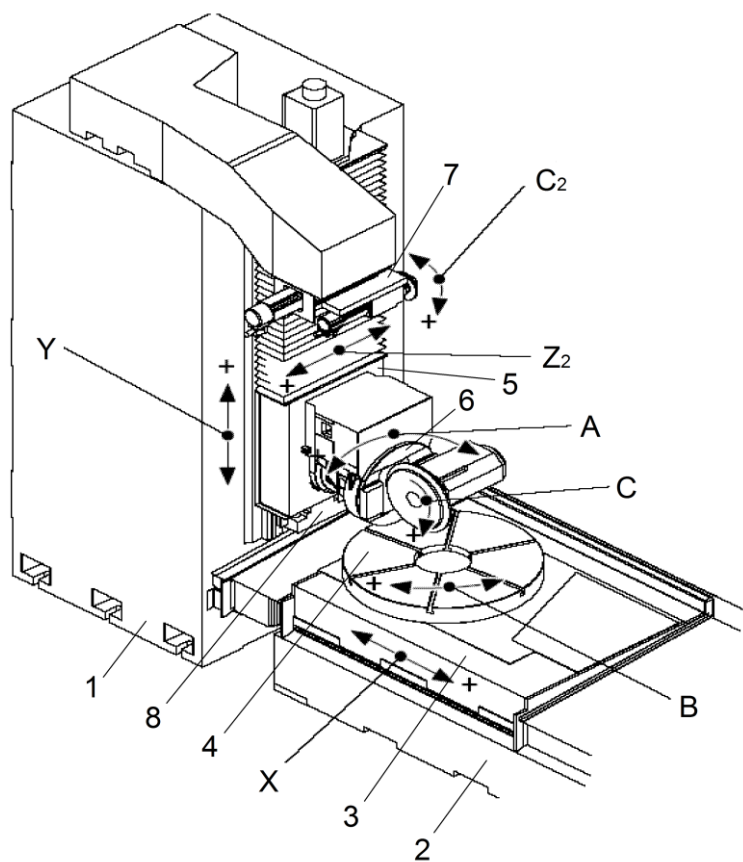
Narzędzia FS również kształtują obwiednię, jednak w tych przypadkach nie są odwzorowywane w kinematyce metody obróbki linie czy powierzchnie chwilowych obrotów, dlatego też np. w języku rosyjskim jest w użyciu nazwa *bezcentroidnoje ogibanije* – np. [4].

3. SZLIFOWANIE KSZTAŁTOWE UZĘBIĘŃ WALCOWYCH ZEWNĘTRZNYCH PROSTYCH I ŚRUBOWYCH

3.1. Kinematyka szlifierki

Badania autorów dotyczyły dokładności obróbki na szlifierce Rapid 900 firmy HOEFLER. Szlifowanie powierzchni bocznych zębów za pomocą ściernicy zaprofilowanej na kształt jednego wrębu odbywa się w wyniku nawrotnych ruchów posuwowych ściernicy wzdłuż osi koła zębatego oraz obrotu ściernicy. Przy kącie pochylenia linii zęba $\beta > 0^\circ$ dodatkowo następuje synchronizacja ruchu posuwisto-zwrotnego ściernicy wzdłuż osi szlifowanego koła z ruchem obrotowym stołu w celu uzyskania liniowego kontaktu ściernicy ze szlifowanym kołem wzdłuż linii śrubowej.

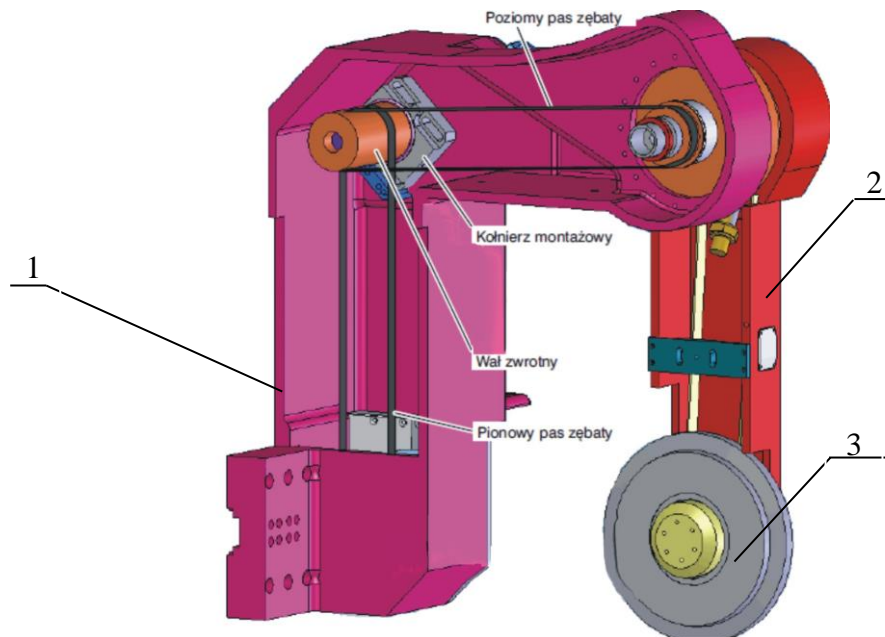
Obrabiarkę tę pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Podstawowe zespoły i osie szlifierki Rapid 900 firmy HOEFLER do szlifowania kształtowo-podziałowego: 1 – stójak, 2 – łożo, 3 – sanie, 4 – stół przedmiotów obrabianych, 5 – sanie narzędziowe, 6 – głowica szlifująca, 7 – sanie i wrzeciono do obciążania ściernicy, 8 – urządzenie pomiarowe (niewidoczne), A, B, C, C₂, X, Y, Z, Z₂ – wykonywane ruchy kinematyczne zespołów obrabiarki [7]

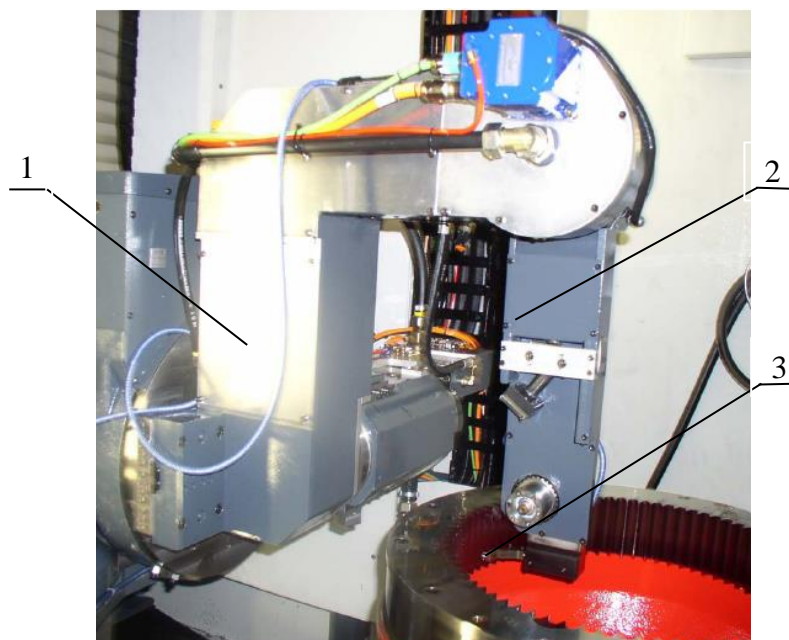
Fig. 2. Basic units and grinding axes of Hoefler's Rapid 900 profile-grinding machine: 1 – stand, 2 – bed, 3 – sleigh, 4 – work piece table, 5 – tool sleigh, 6 – grinding head, 7 – sleigh and grinding wheel spindle 8 – the measuring device (not visible), A, B, C, C₂, X, Y, Z, Z₂ – kinematic motions performed by machine units [7]

Szlifierka ma możliwość szlifowania uzębień wewnętrznych i mierzenia bezpośrednio na obrabiarce dokładności wykonania uzębień, co zobrazowano na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Ramię do szlifowania uzębień wewnętrznych w kołach zębatach: 1 – korpus głowicy szlifierskiej, 2 – ramię szlifierskie, 3 – ściernica [7]

Fig. 3. Arm for internal gear cogs grinding: 1 – body of the grinding head, 2 – grinding arm, 3 – grinding wheel [7]



Rys. 4. Pomiar uzębienia wewnętrznego koła zębatego: 1 – korpus głowicy szlifierskiej, 2 – ramię szlifierskie (pomiarowe), 3 – głowica pomiarowa [7]

Fig. 4. Measurement of internal gear cogs: 1 – body of the grinding head, 2 – grinding arm (measurement), 3 – measuring head [7]

3.2. Przebieg obróbki

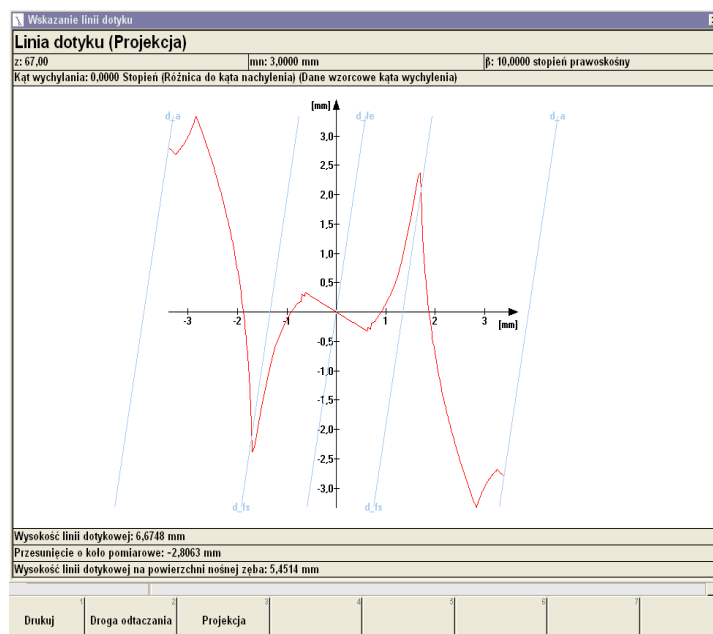
Badania dokładności operacji szlifowania kół zębatach walcowych o uzębieniu zewnętrznym przeprowadzono na kołach zębatach o następującej charakterystyce: $m=3$ mm, $z=67$, $\alpha=20^\circ$, $\beta=10^\circ$, współczynnik przesunięcia $x=0,124$ mm i pochyleniu linii zęba prawym. Koła zębata, w liczbie 10 sztuk, wykonano wg rysunku KH-140-1 ze stali konstrukcyjnej do nawęglania 18HGT (18CrMo4), o zawartości następujących pierwiastków: 0,17% C, 1,30% Cr, 0,80% Mn, 0,05% T.

Po operacji toczenia uzębienie kół zębatach nacinano frezem ślimakowym NFMc klasy Bp o następującej charakterystyce: $m=3$, $\alpha=20^\circ$, $\lambda=2^\circ35'$, wysokość frezu $H=52,34$ mm, z promieniem zaokrąglenia 0,6 mm, na frezarce obwodniowej ZFWZ 250×5 firmy WMW Modul. W czasie frezowania obwodniowego stosowano następujące parametry skrawania: $n_f=90$ obr/min i $f=1,0$ mm/obr. oraz intensywne chłodzenie i smarowanie płynem AVIAKOL-EP-22.

Po frezowaniu oraz gratowaniu zębów kół zębatach poddano je obróbce cieplno-chemicznej wg instrukcji IP-10.03, obowiązującej w Bielskiej Fabryce Reduktorów i Moto-reduktorów BEFARED. Koła zębata zostały nawęglone na głębokość $0,8$ mm $\pm 0,1$ mm, następnie były hartowane (temperatura $830^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, czas wygrzewania 0,5 h i chłodzenie w oleju) oraz odpuszczane. Po obróbce cieplno-chemicznej koła zębata poddano piaskowaniu a następnie myciu.

Dalej w kołach zębatach szlifowano z jednego ustawienia otwór i jedną z powierzchni czołowych na szlifierce do otworów, natomiast drugą powierzchnią czołową szlifowano na szlifierce do płaszczyzn. Opierając się na wyszlifowanym otworze oraz powierzchni czołowej, za pomocą tulejki rozprężnej szlifowano uzębienie.

Przykładowy przebieg linii kontaktu ściernicy z powierzchniami wrębu koła zębatego o zębach śrubowych pokazano na rysunku 5, co wynika z zastosowania narzędzia kształtowego kształtującego powierzchnią FS.



Rys. 5. Linia kontaktu (kolor czerwony) ściernicy podczas szlifowania wrębu koła zębatego o śrubowej linii zęba $\beta=10^\circ$ [7]

Fig. 5. The contact line (red) of the grinding wheel during grinding of gear notch with a helical cog line $\beta = 10^\circ$ [7]

Do szlifowania kół zębatach użyto jednoprofilowej ściernicy z elektrokorundu SK23w 60/1 G/H 10V 10, firmy *Schleifmittelwerk Burka – Kosmos GmbH*, o wymiarach: 400/358×45/10×127 mm, zaprofilowanej na moduł $m=3$ mm, profil E (50 Grad). Warunki operacji szlifowania były następujące: prędkość obwodowa szlifowania $v_c = 35$ m/s dla ściernicy $\varnothing 400$ mm, prędkość ruchu posuwisto-zwrotnego ściernicy $v_f = 5,2$ m/min, płyn obróbkowy: olej Rotel Spezial 277-4 w ilości 150 l/min.

3.3. Wyniki badań

Pomiary dokładności wykonania uzębienia kół zębatach po szlifowaniu kształtowo-podziałowym przeprowadzono na szlifierce Rapid 900 za pomocą głowicy MAHR, wykorzystując oprogramowanie GEARPRO, oraz na maszynie współrzędnościowej typ UMC 850 firmy CARL ZEISS, wykorzystując oprogramowanie GON, bez konieczności zdejmowania koła zębatego ze szlifierki. Pomiary te są nieodzowną częścią operacji szlifowania, ponieważ szlifierka ma wbudowany w swoje sterowanie moduł pomiarowy. Uruchomienie programu GON w maszynie współrzędnościowej UMC 850 polega na wczytaniu podstawowych parametrów i zasadniczych wymiarów koła zębatego wg kolejności wyznaczonej przez komputer. Brakujące parametry oblicza komputer oraz określa tolerancję wg oczekiwanej klasy dokładności.

W pracy do oceny dokładności wykonania uzębienia przyjęto wg PN-ISO 1328-1:

- całkowitą odchyłkę zarysu F_a ,
- odchyłkę położenia zarysu f_{Ha} ,
- odchyłkę kształtu zarysu f_{fa} ,
- całkowitą odchyłkę linii zęba F_β ,
- odchyłkę położenia linii zęba $f_{H\beta}$,
- odchyłkę kształtu linii zęba $f_{f\beta}$,
- odchyłkę sumaryczną podziałek koła F_p ,
- odchyłkę podziałki f_{pt} ,
- dopuszczalną nierównomierność sąsiednich podziałek f_u ,
- bicie promieniowe F_r .

W każdym kole zębatach mierzono prawą i lewą stronę trzech wrębów rozmieszczonych co 120° . Wymienione odchyłki zmierzono na szlifierce za pomocą głowicy pomiarowej usytuowanej na ramieniu pomiarowym, ponadto takie odchyłki, jak: F_a , f_{Ha} , f_{fa} , F_β , $f_{H\beta}$, $f_{f\beta}$, zmierzono dodatkowo na współrzędnościowej maszynie pomiarowej firmy CARL ZEISS UMC 850. W jednym kole zębatach po frezowaniu obwiedniowym oraz w drugim po frezowaniu i szlifowaniu wycięto po trzy zęby w celu wykonania pomiaru wybranych parametrów chropowatości powierzchni 3D boków zębów. Pomiary chropowatości przeprowadzono za pomocą profilometru Perthometer Concept firmy MAHR, wykorzystując oprogramowanie Perthometer Concept 7.0-19.

Do oceny chropowatości powierzchni 3D boków zębów przyjęto następujące parametry: S_a , S_q , S_p , S_v , S_t , S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{mr1} i S_{mr2} , oraz topografię powierzchni, rozkład wysokości rzędnych powierzchni i krzywą powierzchniowego udziału materiałowego.

Na rysunku 6 przedstawiono chropowatość powierzchni 3D zarysu boku zęba po frezowaniu obwiedniowym, obejmującą: topografię powierzchni, rozkład wysokości rzędnych powierzchni oraz krzywą powierzchniowego udziału materiałowego, natomiast na rysunku 7 – chropowatość powierzchni 3D po frezowaniu i następnie szlifowaniu.

4. PROBLEMY KSZTAŁTOWANIA UZĘBIEŃ STOŻKOWYCH O ZARYSACH EWOLWENTY SFERYCZNEJ

Możliwość uzyskania ewolwenty sferycznej za pomocą obrabiarek konwencjonalnych była znana od dawna jako metoda nacinania uzębień stożkowych o zębach prostych struganiem kopiowym wg wzornika – np. [1].

Podejście współczesne, wykorzystujące frezowanie narzędziami punktowymi z możliwością kojarzenia posuwów w co najmniej 3 osiach, zostało przedstawione przez badaczy z Korei Południowej w pracy [5]. Powierzchnie zębów, w tym przypadku zębów o kołowo-łukowej linii zęba, są tu traktowane jako powierzchnie krzywoliniowe (Sculptured Surface, SS; Free Form Surface, FFS) i frezowane wykończeniowo narzędziami QPS (o kulistej powierzchni działania). Opracowane algorytmy sterowania obejmują zarówno przypadek użycia frezarki 3-osiowej z automatycznie sterowanym stołem obrotowym – podziałowym, jak i frezarki 4-osiowej ze stołem obrotowym.

5. PODSUMOWANIE

W wyniku zastosowania operacji szlifowania kształtowo-podziałowego na szlifierce Rapid 900 uzębienia kół zębatych frezowanych obwiedniowo (wykonanych w klasie dokładności 12.) uzyskano zmniejszenie:

- prawie 19-krotne sumarycznej odchyłki podziałek F_p ,
- prawie 17-krotne odchyłki podziałki f_p ,
- ponad 6-krotne całkowitej odchyłki zarysu F_a ,
- ponad 3-krotne całkowitej odchyłki linii zęba F_β ,
- chropowatości powierzchni określonej parametrem S_a od 2,0 do 3,4 razy, a parametrem S_q – od 2,1 do 3,6 razy.

Wykonane badania potwierdziły przydatność zastosowania metody szlifowania kształtowego w praktyce produkcyjnej.

Bibliografia

1. Kiedrzyński W.N., K.M. Pismanik. 1961. *Obróbka stożkowych kół zębatych*. [In Polish: *Machining bevel gears*]. Warszawa: PWT.
2. Kunstetter S. 1980. *Podstawy konstrukcji narzędzi skrawających*. [In Polish: *Basics of cutting tools*]. Warszawa: WNT.
3. Rodin P.R. 1974. *Metallorežuščije instrumenty*. Kijew: Wyša Škola.
4. Sacharoz G.N. 1983. *Obkatočnyje instrumenty*. Moskwa: Mašnostrojenije.
5. Suh S.H., W.S. Sih, H.D. Hong, D.H. Chung. 2001. "Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41: 833-850.
6. Szadkowski J. 1997. "Sculptured surface machining – Structural Problems". In *Proc. of the 1-st Int. Conf. on Machining and Measurements of Sculptured Surfaces*: 57-68. Krakow, Poland.
7. *Instrukcja obsługi szlifierki*. [In Polish: *Manual grinders*]. HEOFLER Maschinenbau GmbH: Zahnradschleifmaschine Rapid 900.