

Prof. PRz dr hab. inż. Jan BUREK jburek@prz.edu.pl
Mgr inż. Michał GDULA gdulam@prz.edu.pl
Mgr inż. Marcin PŁODZIEN plodzien@prz.edu.pl
Mgr inż. Jarosław BUK jbuk@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska

KSZTAŁTOWANIE ZARYSU ZĘBA KOŁA ZĘBATEGO W PROGRAMOWANIU DIALOGOWYM I PARAMETRYCZNYM

Streszczenie: Celem artykułu było porównanie dokładności zarysu ewolwentowego kół zębatych walcowych o zębach prostych, wykonanych przy programowaniu dialogowym na frezarce obwiedniowej CNC Koepfer 200 i programowaniu parametrycznym w systemie NX 9.0 na wieloosiowym centrum obróbkowym HSC 55 linear. Pomiary zarysów ewolwentowych powierzchni bocznych zębów wykonano na konturografie XC 20.

Słowa kluczowe: zarys ewolwentowy, frezowanie obwiedniowe, frezowanie wieloosiowe, koło zębate walcowe, zęby proste

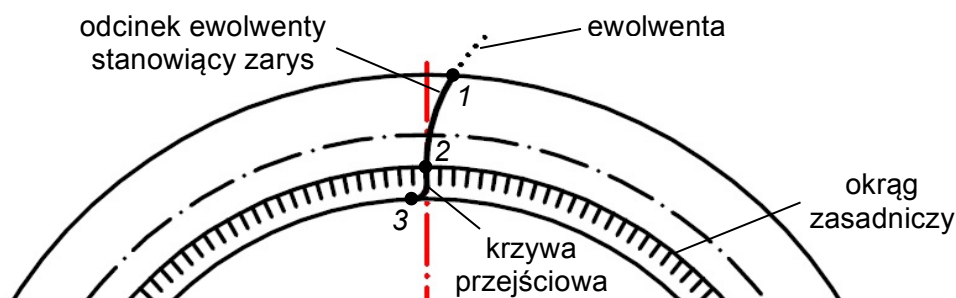
GEAR'S TOOTH PROFILE SHAPING IN DIALOG AND PARAMETRIC PROGRAMMING

Summary: The aim of this article was to compare the accuracy of involute profile of spur gears, manufactured by CNC hobbing machine Koepfer 200 with dialog programming and by multi-axis machining center HSC 55 linear with parametric programming in NX 9.0 system. Measurements of gears involute profiles were performed on contour system XC 20.

Keywords: involute profile, hobbing, multi-axis milling, spur gear, straight teeth

1. WPROWADZENIE

Zarys uzębienia ewolwentowego złożony jest z części położonej nad okręgiem zasadniczym 1-2, opisanej ewolwentą, oraz krzywej przejściowej 2-3 położonej poniżej okręgu zasadniczego (rys. 1.1). Krzywa przejściowa może być projektowana dowolnie, tak aby umożliwiała przejście wierzchołka zęba i nie powodowała zmniejszenia szerokości zęba, a tym samym osłabienia uzębienia przy podstawie [3,5].



Rys. 1.1 Zarys uzębienia ewolwentowego

Obrabiarkami przeznaczonymi do obróbki kół zębatach są najczęściej frezarki obwiedniowe programowane dialogowo. Możliwości technologiczne tych obrabiarek są zawężone do wykonywania elementów układów napędowych, takich jak: koła zębate, ślimacznice, zębatki, ślimaki. Ta cecha, razem z wysokimi kosztami obrabiarki i narzędzi oraz wysoką dokładnością przedmiotów obrabianych, powoduje, że idealnie nadają się do produkcji wielkoseryjnej i masowej. Niekiedy jednak zachodzi potrzeba wykonania pojedynczego bądź niewielkiej ilości kół zębatach. Ze względów ekonomicznych możliwe jest wykorzystanie w tym celu uniwersalnych obrabiarek wieloosiowych sterowanych numerycznie.

Poniżej przedstawiono właśnie możliwości wykonania koła zębatego na wieloosiowym centrum obróbkowym przez programowania parametryczne w systemie NX 9.0.

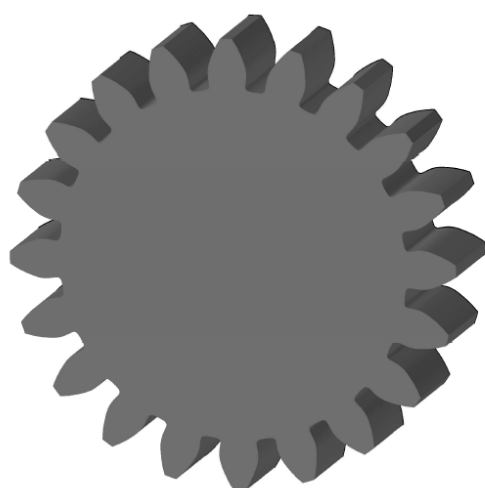
2. PROGRAMOWANIE OBRÓBK

W badaniach wykorzystano koła zębate walcowe o zębatach prostych wykonane ze stopu aluminium 6061, o średnicy wierzchołkowej $d_a = 66$ mm, szerokości $b = 20$ mm, module $m = 3$ mm, liczbie zębatach $z_k = 20$ i kącie zarysu $\alpha = 20^\circ$.

2.1 Programowanie dialogowe

Układ sterowania frezarki obwiedniowej Koepfer 200 jest wyposażony w nakładkę programowania dialogowego KOEPFER-DIALOG 07. Programowanie polega na uzupełnianiu kolejnych rekordów danych dotyczących: przedmiotu obrabianego, narzędzia, parametrów skrawania oraz położenia przedmiotu obrabianego i narzędzia. Program dialogowy nie wymaga przygotowania modelu 3D-CAD.

Koło zębate opisywane jest przy pomocy parametrów geometrycznych w rekordzie danych koła (rys 2.1.1).



frez obwiedniowe: G-M3	
dane geometryczne	
modul normalny	3.000 mm
liczba zebow	20
kat natarcia	20.000 grd
wspolczynnik skoku zlobka	0.000 grd
kierunek skosu	w pr.
srednica surowej czesci	66.000 mm
srednica kola wierzchołkowego	66.000 mm
wysokosc zeba	6.750 mm
srednica kola dna urebow	52.500 mm
dlugosc zazeblenia	20.000 mm
wspolczynnik przesuniecie profilu	0.000 mm
barylkatowosc na flance	0.000 mm
stozkowatosc	

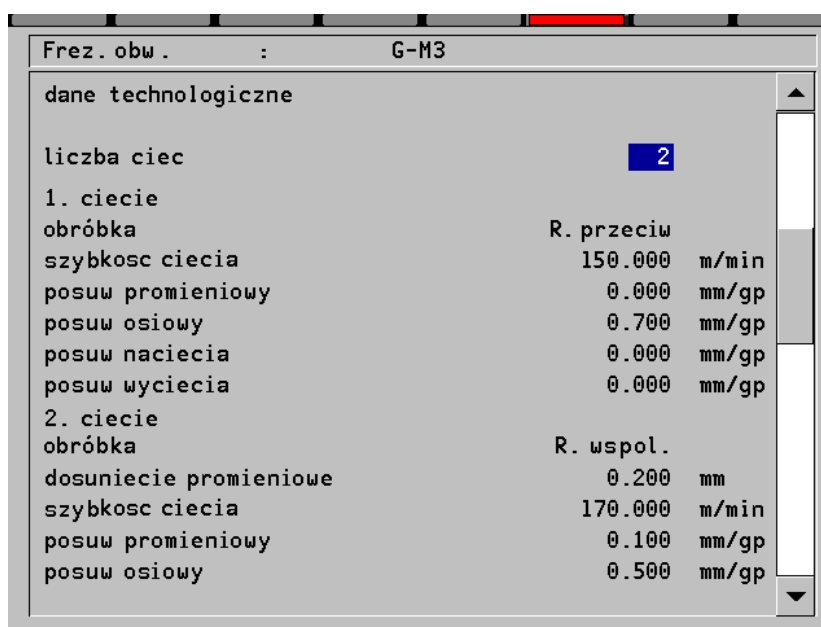
Rys. 2.1.1 Rekord danych koła zębatego

Dane geometryczne narzędzia są zapisywane w rekordzie danych narzędzia (rys 2.1.2).



Rys. 2.1.2 Rekord danych narzędzia

Parametry obróbki zadawane są w rekordzie wyboru strategii i parametrów obróbki (rys 2.1.3). Obróbkę zgrubną wykonano frezowaniem przeciwbieżnym z prędkością skrawania $v_c = 150$ mm/min i posuwem $f = 0,7$ mm/obr, a obróbkę wykończeniową frezowaniem współbieżnym z $v_c = 170$ mm/min, $f = 0,5$ mm/obr i głębokością skrawania $a_p = 0,2$ mm.



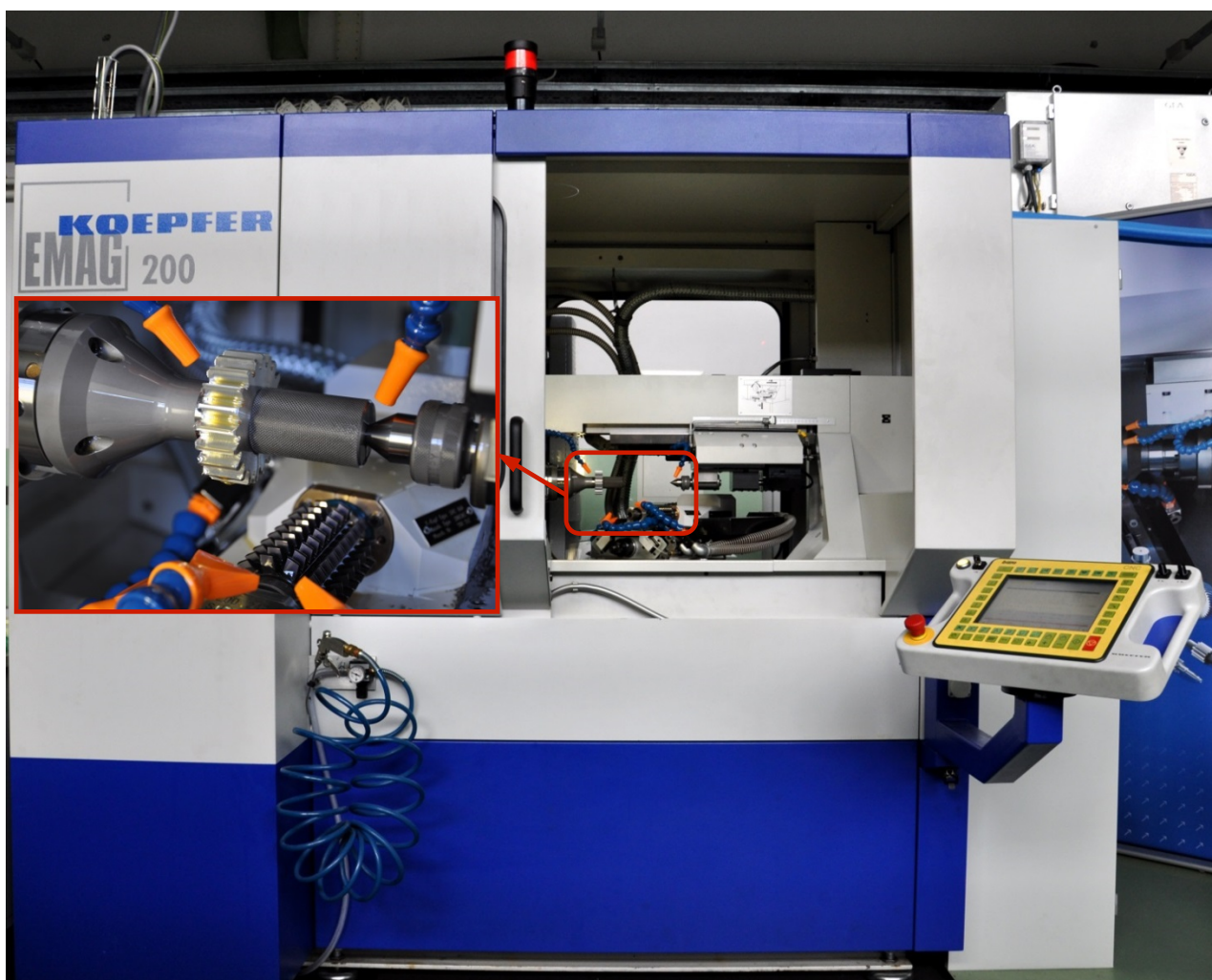
Rys. 2.1.3 Rekord wyboru strategii obróbki i parametrów skrawania

Ostatnim etapem programowania było uzupełnienie rekordów dotyczących położenia przedmiotu obrabianego we wrzecionie oraz narzędzia w głowicy frezarskiej (rys 2.1.4).



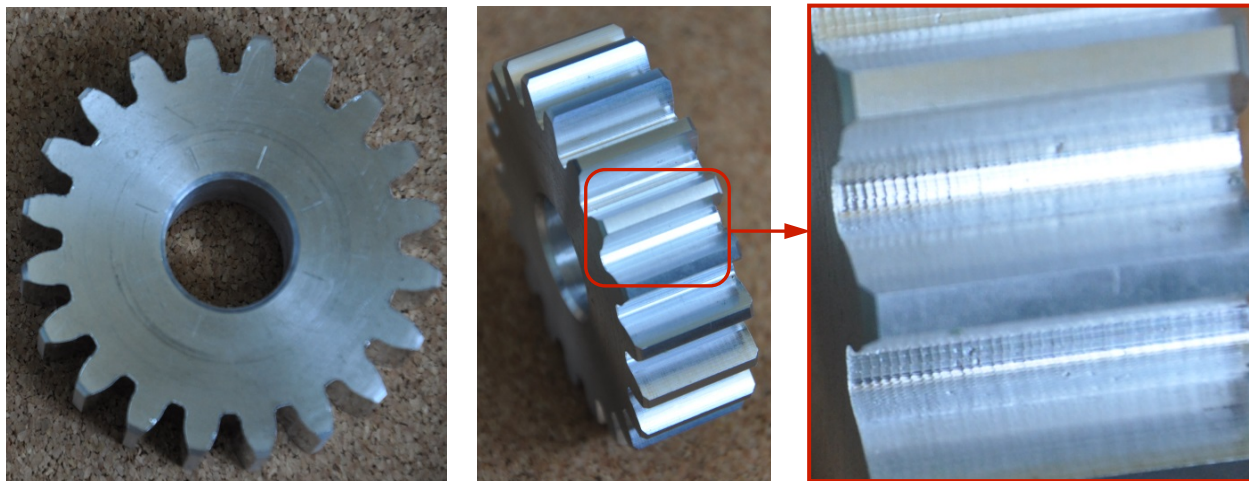
Rys. 2.1.4 Rekordy położenia przedmiotu obrabianego i narzędzia

Wygenerowany program wykonano na frezarce obwiedniowej CNC Koepfer 200 (rys. 2.1.5).



Rys. 2.1.5 Frezarka obwiedniowa CNC Koepfer 200

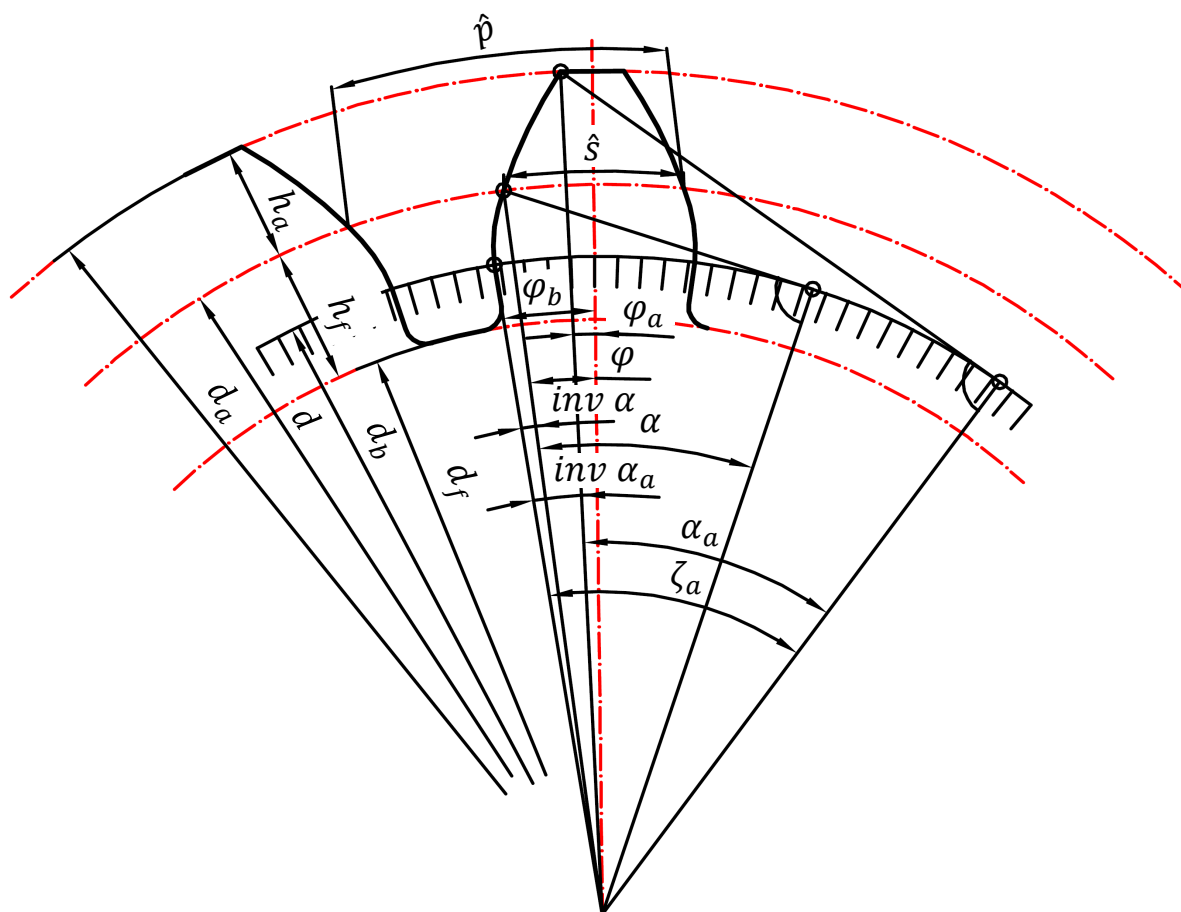
Wykonane koło zębate przedstawiono na rys. 2.1.6.



Rys. 2.1.6 Koło zębate wykonane na frezarce obwiedniowej

2.2 Programowanie parametryczne

Wykonanie koła zębatego na 5-osiowym centrum obróbkowym wymagało przygotowania modelu 3D-CAD przedmiotu obrabianego. Aby uzyskać precyzyjną geometrię zarysu ewolwentowego wykonano parametryczny model w systemie NX 9.0. Podstawowe parametry koła walcowego przedstawiono na rys. 2.2.1.



Rys. 2.2.1 Parametry koła zębatego

Parametry te posłużyły w następnym etapie do utworzenia listy parametrów w zakładce „Expressions” (rys. 2.2.2).

Name	Formula	Value	Ur
alfa	20	20	
alfa_a	arccos(db/da)	31.32125793	
b	20	20	
d	z*m	60	
da	d+2*ha	66	
db	cos(alfa)*d	56.38155725	
df	d-2*hf	52.5	
fi	s/d*180/pi()	4.5	
fi_db	fi+ inv_alfa	5.353958292	
ha	m	3	
hf	1.25*m	3.75	
inv_alfa	(tan(alfa)*180/pi())-alfa	0.8539582918	
inv_alfa_a	(tan(alfa_a)*180/pi())-alfa_a	3.544245093	
kat_odwniecia	alfa_a+inv_alfa_a	34.86550302	
m	3	3	
p	pi()*m	9.424777961	
s	p/2	4.71238898	
t (Law Defined Spline(2) X Law: Function Parameter)	0	0	
waruenk_3 (Instance[0](14)/Extrude(14) Suppression Status...)	if(db<=df(0))else(1)	1	
warunek (Trim Curve(6) Suppression Status...)	if (db>df(0))else(1)	0	
warunek4 (SKETCH_004:Sketch(10) Suppression Status)	if(db>df(0))else(1)	0	
warunek_2 (SKETCH_002:Sketch(8) Suppression Status)	if(db<=df(0))else(1)	1	
warunek_5 (Instance[0](12)/Extrude(12) Suppression Status...)	if(db>df(0))else(1)	0	
xt (Law Defined Spline(2) X Law: Function Equation)	db/2*(sin(kat_odwniecia*t)-(kat_odwniecia*pi()/180)*t*cos(kat_odwniecia*t))	0	
yt (Law Defined Spline(2) Y Law: Function Equation)	db/2*(cos(kat_odwniecia*t)+(kat_odwniecia*pi()/180)*t*sin(kat_odwniecia*t))	28.19077862	
z	20	20	
zt (Law Defined Spline(2) Z Law: Function Equation)	0	0	

Type: Number Length:
 Name:
 Formula:
 OK Apply Cancel

Rys. 2.2.2 Lista parametrów w zakładce „Expressions”

Parametry modelu wyznaczono z zależności (2.2.2÷2.2.17) [2,3]. W wyjaśnieniach oznaczeń przypisano w nawiasach odpowiadające nazwy parametrów przyjęte w systemie NX 9.0. Miary łukowe wyrażane w radianach, zastąpiono kątowymi wyrażonymi w stopniach, korzystając z zależności (2.2.1) [2].

$$\delta = \hat{\delta} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (2.2.1)$$

gdzie:
 δ – kąt w mierze stopniowej [°]
 $\hat{\delta}$ – kąt w mierze łukowej [rad]

$$d = z_k \cdot m_n \quad (2.2.2)$$

gdzie:
 d (d) – średnica podziałowa [mm]
 z_k (z) – liczba zębów
 m_n (m) – moduł normalny [mm]

$$h_a = m_n \quad (2.2.3)$$

gdzie:

h_a (ha) – wysokość głowy zęba [mm]

m_n (m) – moduł normalny [mm]

$$d_a = d + 2 \cdot h_a \quad (2.2.4)$$

gdzie:

d_a (da) – średnica wierzchołków [mm]

d (d) – średnica podziałowa [mm]

h_a (ha) – wysokość głowy zęba [mm]

$$h_f = 1.25 \cdot m_n \quad (2.2.5)$$

gdzie:

h_f (hf) – wysokość głowy zęba [mm]

m_n (m) – moduł normalny [mm]

$$d_f = d - 2 \cdot h_f \quad (2.2.6)$$

gdzie:

d_f (df) – średnica podstaw [mm]

d (d) – średnica podziałowa [mm]

h_a (ha) – wysokość stopy zęba [mm]

$$d_b = \cos \alpha \cdot d \quad (2.2.7)$$

gdzie:

d_b (db) – średnica zasadnicza [mm]

d (d) – średnica podziałowa [mm]

α (α) – kąt zarysu [°]

$$\alpha_a = \arccos(d_b/d_a) \quad (2.2.8)$$

gdzie:

α_a (α_a) – kąt zarysu na walcu wierzchołków [°]

d_b (db) – średnica zasadnicza [mm]

d_a (da) – średnica wierzchołków [mm]

Kąt zarysu na walcu podziałowym α oraz kąt zarysu na walcu wierzchołków α_a pozwolą na wyznaczenie funkcji ewolwentowych $\text{inv } \alpha$ i $\text{inv } \alpha_a$ (2.2.9;2.2.10).

$$\text{inv } \alpha = (\tan \alpha) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \alpha \quad (2.2.9)$$

gdzie:

$\text{inv } \alpha$ ($\text{inv } \alpha$) – involuta kąta α [°]

α (α) – kąt zarysu [°]

$$\text{inv } \alpha_a = (\tan \alpha_a) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} - \alpha_a \quad (2.2.10)$$

gdzie:

$inv \alpha_a$ (inv_alfa_a) – involuta kąta zarysu α_a [°]

α_a ($alfa_a$) – kąt zarysu na walcu wierzchołków [°]

$$\zeta_a = \alpha_a + inv \alpha_a \quad (2.2.11)$$

gdzie:

ζ_a ($kat_odwinięcia$) – kąt odwinięcia ewolwenty [°]

$inv \alpha_a$ (inv_alfa_a) – involuta kąta zarysu α_a [°]

α_a ($alfa_a$) – kąt zarysu na walcu wierzchołków [°]

$$\varphi = \frac{\hat{s}}{d} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (2.2.12)$$

gdzie:

φ (fi) – kąt środkowy na walcu podziałowym [°]

\hat{s} (s) – grubość zęba na walcu podziałowym [rad]

d (d) – średnica podziałowa [mm]

$$\hat{s} = \frac{\hat{p}}{2} \quad (2.2.13)$$

gdzie:

\hat{s} (s) – grubość zęba na walcu podziałowym [rad]

\hat{p} (p) – podziałka na kole podziałowym [rad]

$$\hat{p} = \pi \cdot m_n \quad (2.2.14)$$

gdzie:

\hat{p} (p) – podziałka na kole podziałowym [rad]

m_n (m) – moduł normalny [mm]

$$\varphi_b = \varphi + inv \alpha \quad (2.2.15)$$

gdzie:

φ_b (fi_db) – kąt środkowy na walcu zasadniczym [°]

φ (fi) – kąt środkowy na walcu podziałowym [°]

$inv \alpha$ (inv_alfa) – involuta kąta α [rad]

Po obliczeniu funkcji ewolwentowych, wyznaczono kąt odwinięcia ewolwenty ζ_a , z zależności (2.2.11), a następnie współrzędne dowolnego punktu ewolwenty z układu równań (2.2.16) [3].

$$\begin{cases} x = \frac{d_b}{2} \cdot (\sin \zeta_a - \hat{\zeta}_a \cdot \cos \zeta_a) \\ y = \frac{d_b}{2} \cdot (\cos \zeta_a - \hat{\zeta}_a \cdot \sin \zeta_a) \end{cases} \quad (2.2.16)$$

gdzie:

x, y – współrzędne dowolnego punktu ewolwenty

ζ_a – kąt odwinięcia ewolwenty [°]

$\hat{\zeta}_a$ – kąt odwinięcia ewolwenty [rad]

d_b – średnica zasadnicza [mm]

Analogicznie utworzono układ równań (2.2.17) opisujących ewolwentę w systemie NX 9. Współrzędne x_t i y_t przedstawiono w funkcji parametru t korzystając z narzędzia „Low Defined Spline” (rys 2.2.3).

$$\begin{cases} x_t = \frac{db}{2} \cdot \left(\sin(kat_odwinięcia \cdot t) - (kat_odwinięcia \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot t) \cdot \cos(kat_odwinięcia \cdot t) \right) \\ y_t = \frac{db}{2} \cdot \left(\cos(kat_odwinięcia \cdot t) - (kat_odwinięcia \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot t) \cdot \sin(kat_odwinięcia \cdot t) \right) \end{cases} \quad (2.2.17)$$

gdzie:

x_t, y_t – współrzędne dowolnego punktu ewolwenty

$kat_odwinięcia$ – kąt odwinięcia ewolwenty [°]

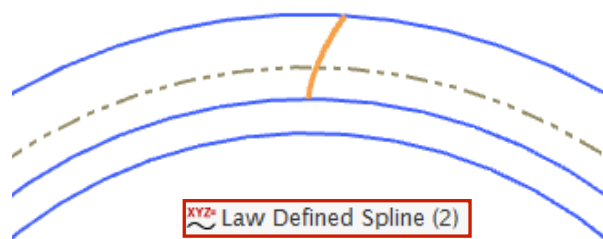
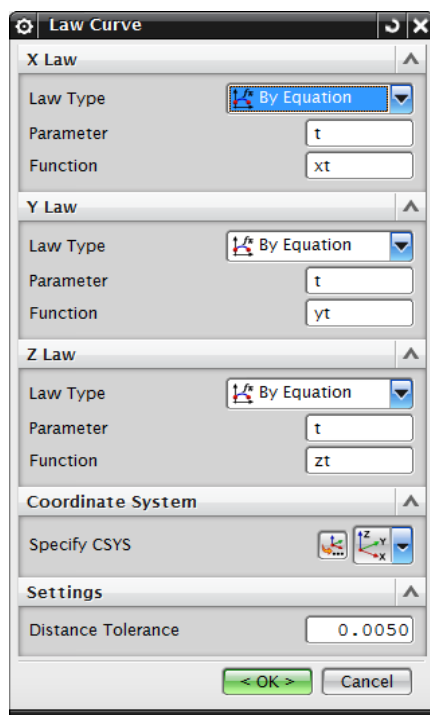
db – średnica zasadnicza [mm]

t – parametr funkcji

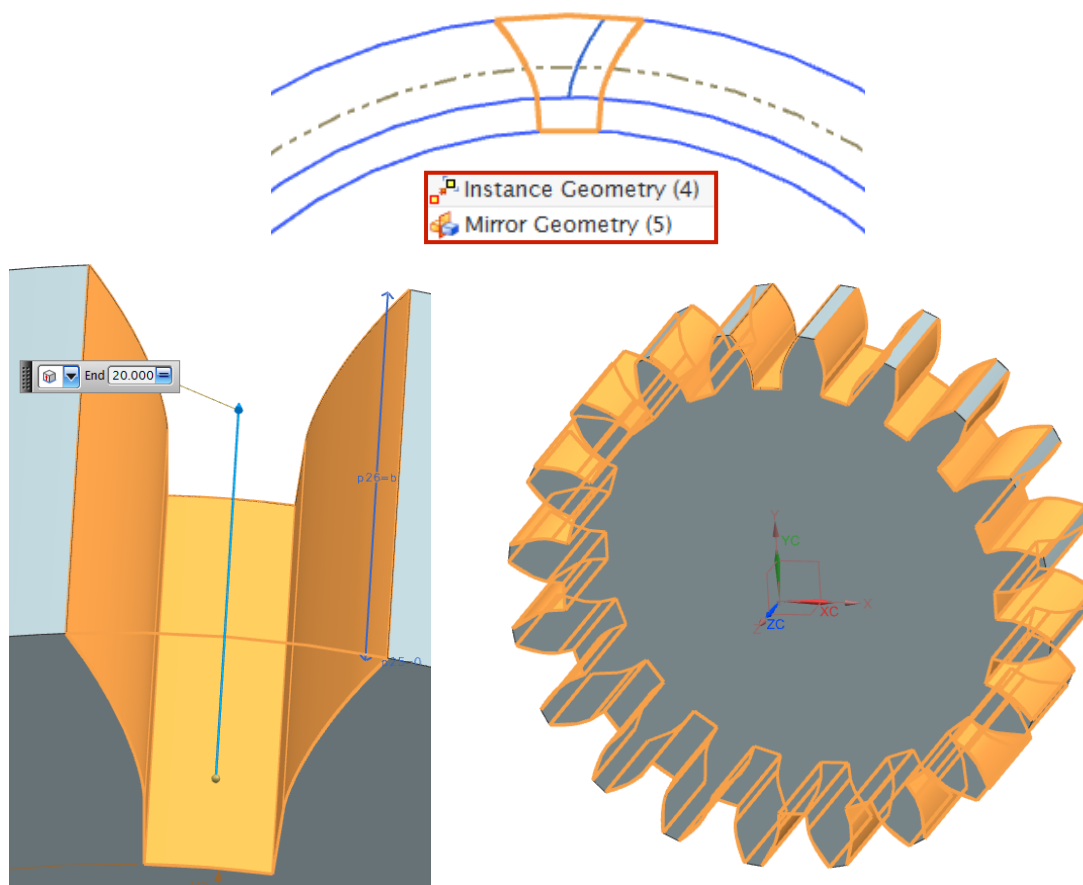
Z końca otrzymanej ewolwenty, znajdującego się na okręgu zasadniczym poprowadzono stycznie krzywą przejściową. Promień krzywej przejściowej pominięto, gdyż był on wynikiem zastosowania do obróbki frezu kulistego. Tak otrzymany zarys zęba przesunięto przy użyciu funkcji „Instance Geometry”. Następnie wykonano lustrzane odbicie „Mirror Geometry” i połączono zarysy zębów tworząc szkic wrębu międzyzębego (rys. 2.2.4). Otrzymany szkic posłużył do zamodelowania wrębu. Następnie korzystając z funkcji szyku kołowego „Circular Array” otrzymano wieniec koła zębatego.

Program obróbki koła zębatego przygotowano z wykorzystaniem modułu CAM systemu NX9.0, na podstawie geometrii 3D-CAD koła zębatego.

Pierwszą czynnością był dobór oraz utworzenie w module CAD półfabrykatu w celu prawidłowego zdefiniowania środowiska *WORKPIECE* oraz struktury drzewa geometrii. Od poprawności ich określenia zależy także poprawność generowania pięcioosiowych ścieżek narzędziowych.



Rys. 2.2.3 Zakładka funkcji Law Defined Spline i parametryczny model ewolwenty

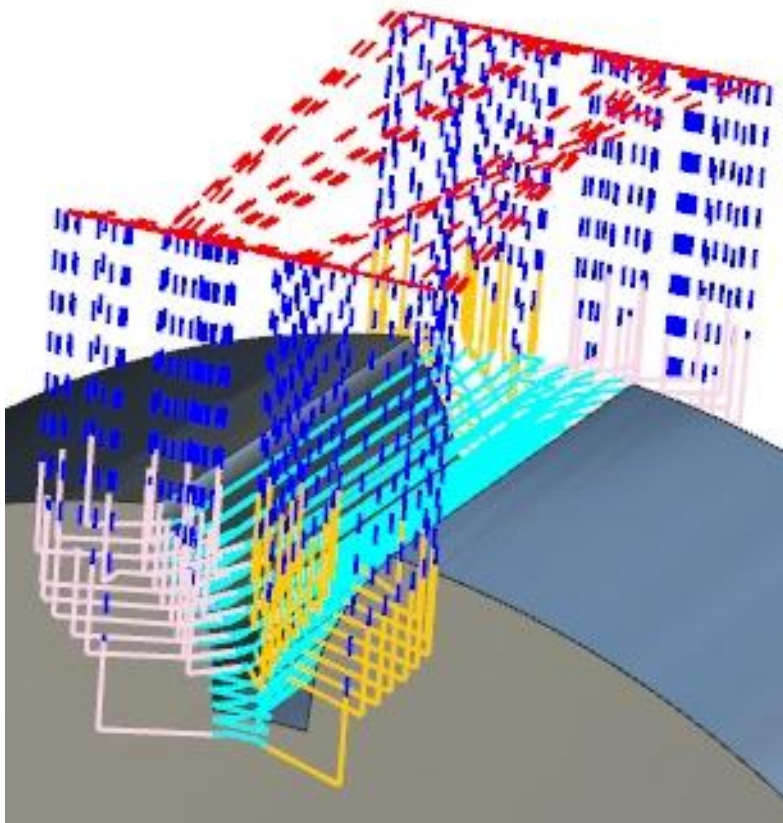


Rys. 2.2.4 Model wrębu międzyzębego i gotowy model parametryczny koła zębatego

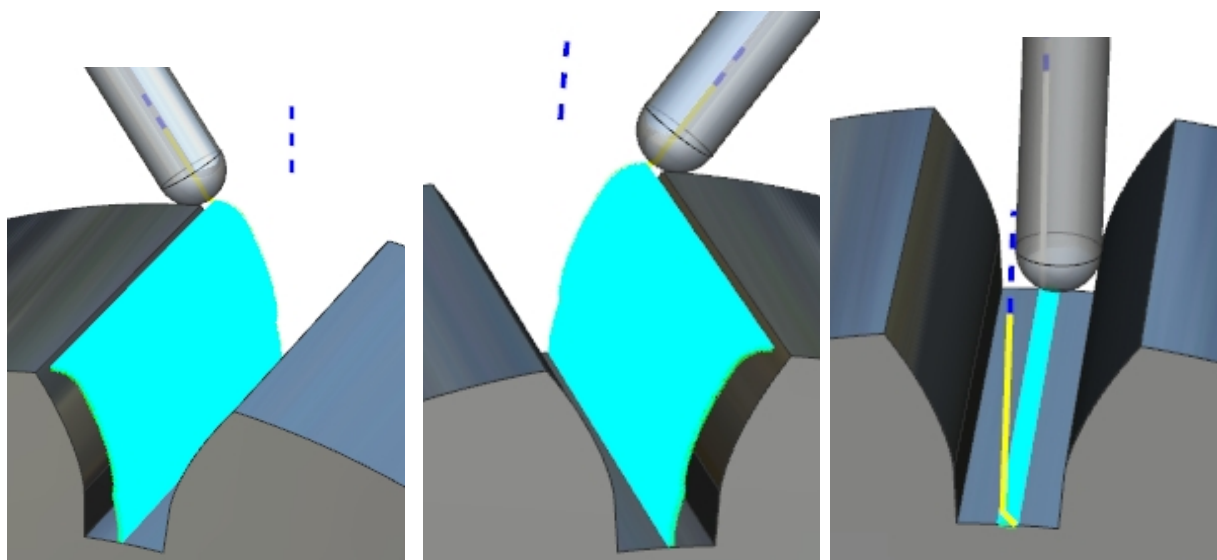
Obróbkę koła zębatego dla uniwersalnej pięcioosiowej obrabiarki CNC podzielono na cztery etapy: zgrubną wrębu międzyzębego, wykończeniową boku lewego, prawego oraz dna wrębu. Promienie przejściowe między lewym i prawym bokiem zęba a dnem wrębu międzyzębego zostały ukształtowane przez ostatnie przejście w obróbce wykończeniowej obu boków wrębu frezem kulistym. W celu skrócenia czasu programowania obróbki CAM ograniczono się tylko do wykonania programu dla jednego wrębu, po czym dokonano transformacji ścieżek o odpowiedni kąt podziałowy transformacji.

Obróbkę zgrubną zaprogramowano jako pięcioosiową pozycjonowaną współbieżną z wykorzystaniem operacji *Cavity Mill* wykonywaną frezem walcowo – czołowym. Jest to operacja z rodziny trzyosiowych obróbek 3D *mill contour*. Zastosowanie trzyosiowej obróbki zgrubnej wrębu międzyzębego uzasadniona jest zwiększeniem wydajności i skróceniem czasu trwania procesu. Ponadto taki sposób prowadzenia obróbki pozwala na możliwie maksymalne usunięcie zgrubnego nadatku obróbkowego z każdej strony elementu w jednym zamocowaniu. Widok ścieżek narzędziowych poszczególnych operacji zgrubnej przedstawiono na rys. 2.2.5.

Obróbkę wykończeniową boków zęba oraz dna wrębu zaprogramowano jako pięcioosiową symultaniczną współbieżną z wykorzystaniem operacji *Variable contour*, wykonywaną frezem kulistym. W operacjach tych ustawione zostały odpowiednie wartości parametrów, mających bezpośredni wpływ na dokładność wykonania obrabianej powierzchni. Są nimi przede wszystkim tolerancja generowania ścieżki narzędziowej, której wartość jest równa 0.005 mm, oraz krok liniowy poszczególnych segmentów toru ruchu narzędzia, którego wartość ustawiono na 0.5 mm. Wartości technologicznych parametrów skrawania wynoszą odpowiednio: $v_c = 150$ m/min, $f_z = 0.125$ mm/z, $n = 16000$ obr/min, $f_t = 4000$ mm/min. Widok ścieżek narzędziowych obróbki wykończeniowej przedstawiono na rys. 2.2.6.



Rys. 2.2.5 Ścieżki narzędziowe operacji obróbki zgrubnej



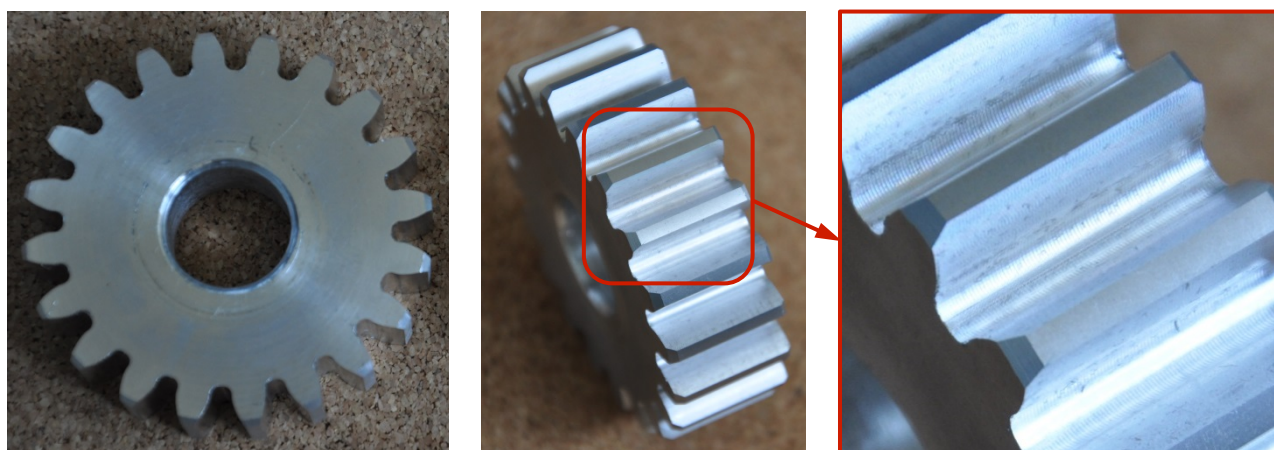
Rys. 2.2.6 Ścieżki narzędziowe obróbki wykończeniowej wrębu międzyzębego

Tak zaprogramowaną obróbkę wrębu międzyzębego w kolejnym etapie poddano transformacji, czyli dokonano w sposób automatyczny podziału kąтового o wartości 20° przy użyciu polecenia *Transform*.

Obróbkę wykonano na 5-osiowym centrum obróbkowym HSC 55 linear (rys. 2.2.7). Gotowe koło zębate przedstawiono na rys. 2.2.8.



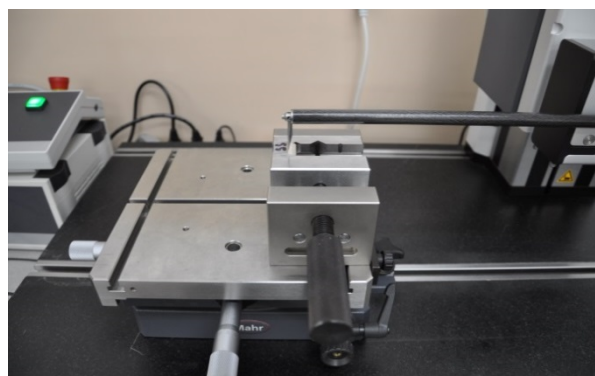
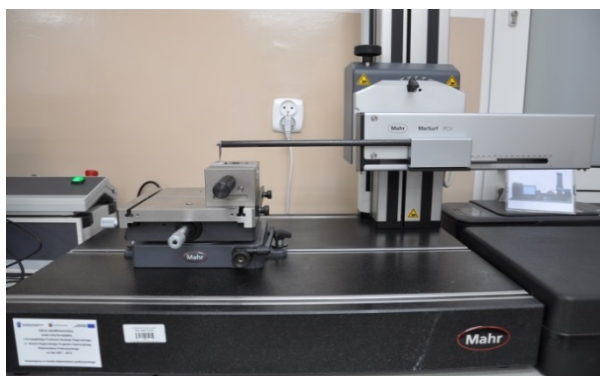
Rys. 2.2.7 Pięcioosiowe centrum obróbkowe HSC 55 linear



Rys. 2.2.8 Koło zębate po frezowaniu na centrum obróbkowym HSC 55 linear

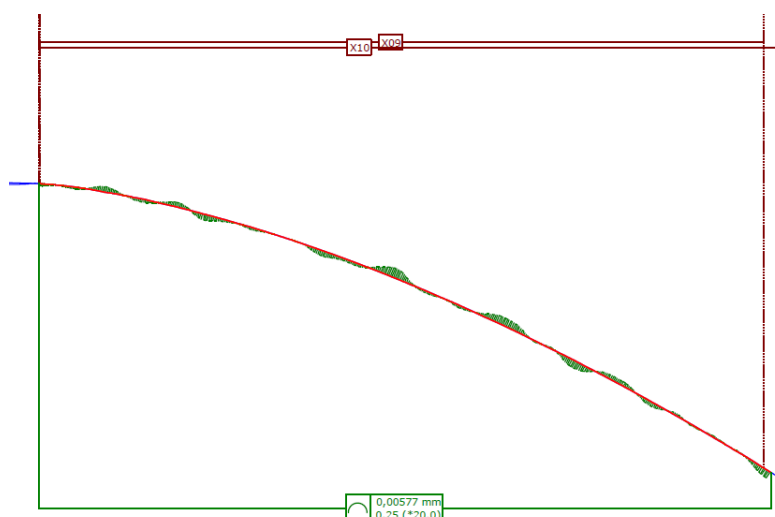
3. WYKONANIE POMIARÓW DOKŁADNOŚCI EWOLWENTY

Pomiar zarysu zęba badanych kół dokonano na powierzchni bocznej wybranego zęba przy pomocy konturografu XC 20, wyposażonego w głowicę PCV 350M x 33 mm 6033/11 (rys. 3.1). Pomiar wykonywano trzykrotnie na każdej powierzchni bocznej zęba, prostopadłe do linii zęba, 1 mm od czoła uzębienia w równych odległościach co 9 mm z prędkością 0,2 mm/s.



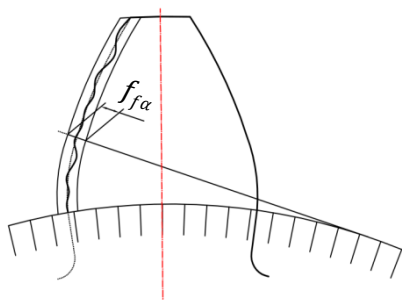
Rys. 3.1 Konturograf XC 20

Ze względu na to, że krzywa przejściowa może być dowolna i w frezowaniu obwiedniowym jest wynikiem obwiedni położenia narzędzia, a w modelu parametrycznym została zaprojektowana stycznie do ewolwenty, jako zakres badanego profilu została wybrana część zarysu zęba o kształcie ewolwenty, położona powyżej koła zasadniczego. Jako zarys nominalny wykorzystano zarys ewolwentowy zaprojektowany w systemie NX 9.0, podobnie jak w opisanym wcześniej modelu 3D-CAD. Zmierzone zarysy ewolwentowe badanych kół porównano z zarysem nominalnym wykorzystując oprogramowanie WinMar (rys. 3.2). Przed pomiarem profile zostały dopasowane przy pomocy funkcji „Skoryguj profil”. Następnie na podstawie porównania profili została obliczona odchyłka zarysu ewolwentowego $f_{f\alpha}$ [1,4]. Wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 3.1.



Rys. 3.2 Przykładowy pomiar odchyłki badanych zarysów ewolwentowych

Tab. 3.1 Odchyłki zarysów ewolwentowych badanych kół



Pomiar	Wartość odchyłki $f_{f\alpha}$, [mm]	
	obrobiarka	
	Koepfer 200	HSC 55 linear
1	0,0077	0,01095
2	0,00761	0,01293
3	0,00993	0,01269
4	0,00577	0,00863
5	0,008645	0,01127
6	0,009851	0,01183

Dla koła zębatego wykonanego na frezarce obwiedniowej CNC Koepfer 200 największa odchyłka wyniosła 9,93 μm , a średnia wartość odchyłki 8,251 μm . W przypadku koła wykonanego na centrum obróbkowym HSC 55 linear największa odchyłka była nieco wyższa 12,93 μm , zaś średnia odchyłka wyniosła 11,383 μm . Przedziały wyznaczone przez graniczne wartości odchyłek dla obu kół są zbliżone i wynoszą odpowiednio 4,32 μm oraz 4,3 μm .

Odchyłki zarysu ewolwentowego $f_{f\alpha}$ badanych kół odpowiadają 7 klasie dokładności wykonania kół zębatach dla frezarki obwiedniowej i 8 klasie dokładności wykonania dla centrum obróbkowego [4].

5. WNIOSKI

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że frezarka obwiedniowa w porównaniu z centrum obróbkowym, pozwala wykonać koła zębata o wyższej dokładności. Zaletą frezarki obwiedniowej jest również czas obróbkowy wynoszący ok. 5 min dla badanego koła zębatego oraz krótki czas programowania. Jednak jest to obrabiarka dedykowana do kół zębatach, dlatego nadaje się do produkcji masowej. Dokładność wykonania koła zębatego na centrum obróbkowym była jedynie o jedną klasę niższa, a różnica największych odchyłek badanych kół wynosiła 3 μm . Większą dokładność można uzyskać zmniejszając głębokość skrawania, jednak istotnie wpływa to na czas obróbki. Ze względu na długi czas obróbki (dla badanego koła zębatego wynosił ok. 60 min) oraz długi czas programowania, centrum obróbkowe z powodzeniem może być wykorzystane do produkcji jednostkowej kół zębatach.

LITERATURA

- [1] Grzelka M.: *Współrzędnościowe pomiary kół zębatach walcowych*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 53, nr 9 bis, Agenda Wydawnicza SIMP, 2007, 489-492
- [2] Markowski T., Mijał M., Rejman E.: *Podstawy konstrukcji maszyn – napędy mechaniczne*, Część I, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1996, 11-33
- [3] Ochęduszek K.: *Koła zębata – konstrukcja*, Tom I, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1985, 61–116
- [4] Ochęduszek K.: *Koła zębata – sprawdzanie*, Tom III, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1975, 236–263
- [5] Paderewski K.: *Obrabiarki do uzębienia kół walcowych*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1991, 10–19