

Dr hab. inż. Jan BUREK, prof. PRz; mgr inż. Jarosław BUK;  
mgr inż. Michał GDULA; mgr inż. Jacek MISIURA (Politechnika Rzeszowska):

## **DOKŁADNOŚĆ ZARYSU I L INII ZĘBA KÓŁ STOŻKOWYCH WYKONYWANYCH WEDŁUG PROGRAMU GEARMILL NA 5-OSIOWYM CENTRUM FREZARSKIM**

### Streszczenie

Prezentowane wyniki badań dokładności zarysu i linii zęba kół stożkowych o zębach lukowych wykonywanych według specjalnego oprogramowania przeznaczonego do obróbki tego rodzaju kół na 5-osiowej frezarce DMG 100. Omówiono: sposób obróbki, dobór narzędzi i parametrów obróbki oraz ocenę dokładności wykonanego koła na podstawie porównania z modelem teoretycznym.

***Słowa kluczowe:** koła zębate stożkowe o zębach lukowych, gearMILL, dokładność zarysu zęba, dokładność linii zęba*

## **ACCURACY OF SPIRAL BEVEL GEARS TOOTH PROFILE AND PITCH LINE PERFORMED BY GEARMILL AND MANUFACTURED ON THE 5- AXIS DMG MILLING MACHINE.**

### Abstract

In the paper were presented the research of the accuracy of tooth profile and pitch line of the spiral bevel gear performed by dedicated software for manufacturing this type of gears on 5- axis milling machine DMG 100. Will be presented: method of manufacturing, selection of machining parameters and tools, furthermore comparison of the accuracy of the manufactured gear with the theoretical model.

***Key words:** spiral bevel gears, gearMILL, tooth profile accuracy, accuracy of tooth pitch line*

# **DOKŁADNOŚĆ ZARYSU I LINII ZĘBA KÓŁ STOŻKOWYCH WYKONYWANYCH WG PROGRAMU GEARMILL NA 5- OSIOWYM CENTRUM FREZARSKIM**

Jan BUREK<sup>1</sup>, Jarosław BUK<sup>1</sup>, Michał GDULA<sup>1</sup>, Jacek MISIURA<sup>1</sup>

## 1. WSTĘP

Wśród stosowanych metod wytwarzania kół zębatych stożkowych można wyróżnić: metodę Gleasone do obróbki kół zębatych o kołowo-łukowej linii zęba, metodę Fiat-Mammano do obróbki kół o spiralno-łukowej linii zęba, metodę Klingelnerga (Palloid) do obróbki kół o ewolwentowej linii zęba oraz metody Oerlikona i Klingelnerga (Cyclo Palloid) do obróbki kół stożkowych o epicykloidalnej linii zęba [3,5]. Wszystkie te metody wymagają dedykowanych do tych metod obrabiarek i narzędzi specjalnych.

Rozwój wieloosiowych obrabiarek CNC, a także komputerowych technik wspomagania projektowania oraz wytwarzania CAD/CAM pozwala na nowe możliwości obróbki kół zębatych stożkowych. W ostatnim czasie zaproponowano nową technologię produkcji kół zębatych, łączącą uniwersalne wieloosiowe centra obróbkowe oraz dedykowany do tego celu program CAD/CAM GearMILL [4]. Ekonomiczność i uniwersalność tej technologii umożliwia wykorzystanie standardowych narzędzi, które pozwalają wykonać szeroką gamę różnorodnych kół zębatych o różnych modułach i średnicach [1,2,4].

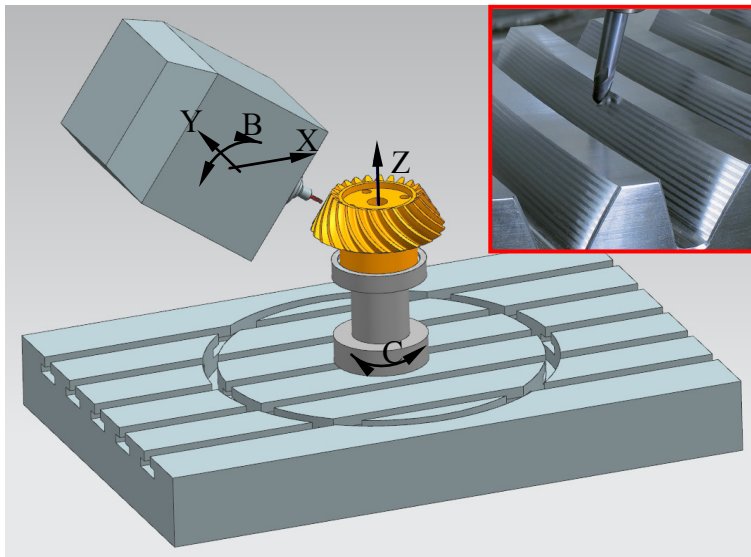
W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dokładności zarysu i linii zęba w stosunku do modelu CAD, kół zębatych wykonywanych tą metodą. Przedstawiono także złożoną kinematykę obróbki, metodę generowania modelu koła zębatego stożkowego systemu cyclo-paloid Klingelnerga oraz programu obróbkowy.

---

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji, 35-959 Rzeszów, ul. W. Pola 2

## 2. PROCES 5-OSIOWEGO FREZOWANIA KOŁA ZĘBATEGO

Koła zębate stożkowe systemu cyclo-palloid Klingelnberga cechują się epicykloidalną linią zęba. Użycie nowej technologii wykorzystującej uniwersalne obrabiarki i standardowe narzędzia do obróbki powierzchni bocznej zęba o tak skomplikowanej geometrii wymaga zastosowania centrum obróbkowego o złożonej kinematyce przedstawionej na rys. 1.



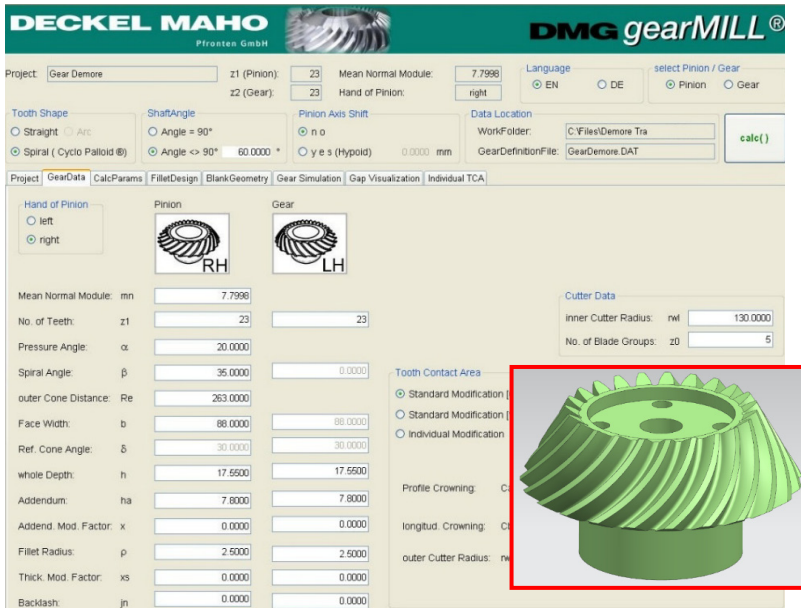
Rys. 1. Kinematyka procesu 5-osioowego frezowania koła zębatego

Głowica frezarska z zamocowanym narzędziem, wykonuje ruchy prostoliniowe w osiach X, Y oraz ruch obrotowy w osi B, natomiast stół obrabiarki wyposażony w obrotnicę, na której zamontowany jest przedmiot obrabiany, wykonuje ruch prostoliniowy w osi Z oraz ruch obrotowy w osi C. Kluczowym aspektem przedstawionej technologii jest wykorzystanie walcowej części freza prowadzonego stycznie do powierzchni bocznej zęba charakteryzującego się epicykloidalną linią zęba. Tak zaprojektowana strategia obróbki wymaga wykorzystania symultanicznego ruchu we wszystkich pięciu osiach frezarki.

Programowanie obrabiarki w trybie automatycznym charakteryzuje się generowaniem toru ruchu narzędzia uwzględniającym model półfabrykatu i przedmiotu obrabianego. Do zaprojektowania i opracowania programu obróbkowego wykorzystano oprogramowanie GearMILL, które posiada budowę modułową [1,2,4].

Geometria wrębu międzyzębnego utworzona została w module generowania modelu na podstawie parametrów koła zębatego: moduł normalny  $m_n = 7.8$  mm, liczba zębów  $z1 = 23$ , kąt przyproru  $\alpha = 20^\circ$ , nominalny kąt pochylenia linii zęba  $\beta = 35^\circ$ , dłu-

gość zewnętrzna tworzącej stożka podziałowego  $R_e = 263$  mm, szerokość wieńca  $b = 88$  mm, kąt stożka podziałowego  $\delta = 30^\circ$ , promień krzywej przejściowej  $\rho = 2.5$  mm, wysokość zęba  $h = 17.55$  mm, wysokość głowy zęba  $h_a = 7.8$  mm. Parametry te uzupełniano w kolejnych zakładkach programu GearMILL (rys. 2). Koło zębate wykonano ze stali stopowej 16MnCr5 przeznaczonej do nawęglania i hartowania, wykorzystywanej na elementy konstrukcyjne m. in. koła zębate. W kolejnym etapie na podstawie podanych wcześniej parametrów wygenerowany został model 3D-CAD koła stożkowego.

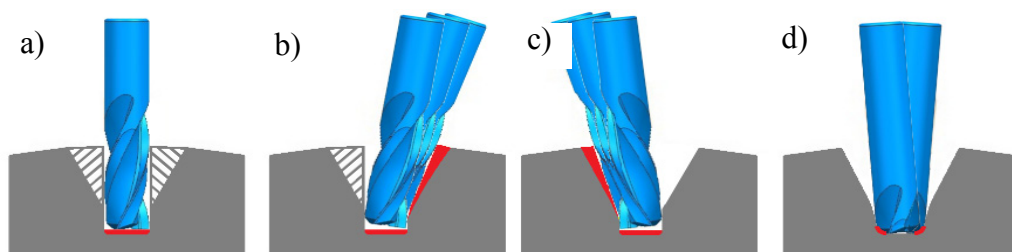


Rys. 2. Zakładka modułu generowania modelu programu GearMILL wraz z widokiem zamodelowanego koła stożkowego<sup>2</sup>

Tak przygotowana geometria wrębu pozwoliła na zaprogramowanie 5-osiowej obróbki w module CAM oprogramowania GearMILL. W tej metodzie obróbki zarys zęba jest kształtowany walcową częścią freza w kolejnych przejściach. Narzędzie prowadzone jest stycznie do powierzchni bocznej zęba. Z tego względu dokładność zarysu zęba będzie zależna od zagęszczenia ścieżek obróbkowych.

Obróbka podzielona jest na: zgrubną, kształtującą i wykończeniową oraz fazowanie ostrych krawędzi głowy zęba. Obróbkę zgrubną, kształtującą i wykończeniową można podzielić na etapy przedstawione na rys. 3. Wszystkie etapy zaprogramowano jako symultaniczne pięcioksiowe frezowanie przeciwbieżne.

<sup>2</sup> Pozwolenie na prezentowanie zrzutu ekranu na podstawie licencji

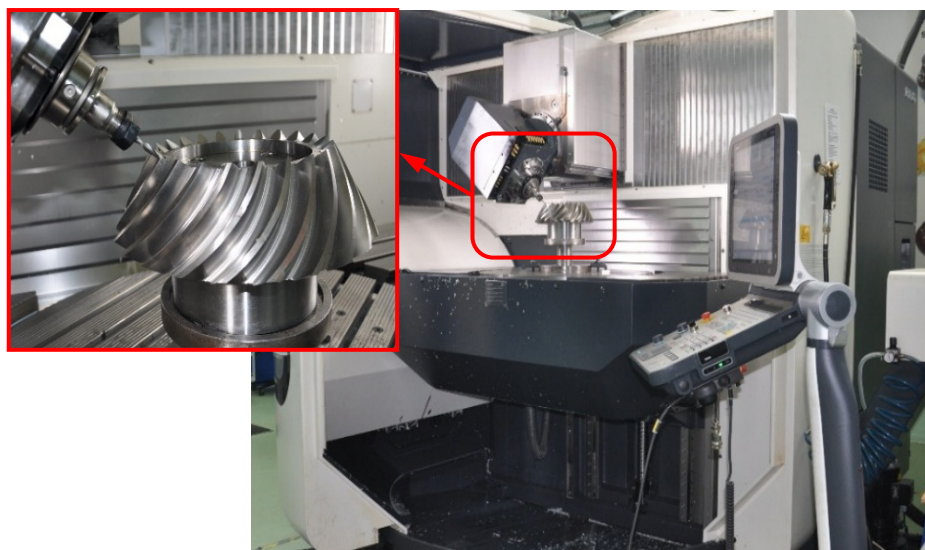


Rys. 3. Etapy obróbki wrębu międzyzębnego na wieloosiowym centrum obróbkowym: a) frezowanie zgrubne rowka międzyzębnego, b) frezowanie boku jednego zęba, c) frezowanie boku sąsiedniego zęba, d) frezowanie stopy zęba

Obróbkę zgrubną wykonano w trzech etapach: frezowanie rowka międzyzębnego i każdego boku zębów sąsiednich (rys. 3a,b,c). Obróbkę kształtującą i wykończeniową wykonuje się różnymi frezami i innymi parametrami obróbki.

## 2. WARUNKI BADAŃ

Badania przeprowadzono na 5-osiowym centrum obróbkowym DMU 100 mono-BLOCK (rys. 4). Ze względu na wykorzystanie wszystkich pięciu osi obrabiarki w szerokim zakresie ruchów niezbędne było zastosowanie podstawy dystansującej przedmiot obrabiany od stołu obrabiarki. Pozwoliło to na swobodne manewrowanie narzędziem zamocowanym w głowicy oraz na uniknięcie kolizji. Podstawa dystansująca została wykonana ze stali konstrukcyjnej jednak jej zastosowanie wymusiło wybór frezowania przeciwbieżnego, gdyż podczas frezowania współbieżnego przedmiot obrabiany wykazywał tendencje do wpadania w drgania. Pozycję mocowania koła ustalono z dokładnością poniżej  $1 \mu m$ . Dobór narzędzi oraz parametrów obróbki dokonano na podstawie katalogu firmy Ingersoll dla stali stopowych przeznaczonych do obróbki cieplno-chemicznej. Warunki realizacji badań przedstawiono w tab.1. Do obróbki zgrubnej zastosowano frez walcowo-czołowy o średnicy  $d = 8 \text{ mm}$ . W obróbce kształtującej wykorzystano dwa frezy o różnej średnicy, w celu uzyskania równomiernego naddatku na obróbkę wykończeniową, który wynosił  $0,35 \text{ mm}$  dla boków zębów oraz  $0,2 \text{ mm}$  dla dna wrębu. Obróbkę wykończeniową również przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch frezów, jednym walcowo-czołowym, drugim kulistym. Powierzchnie boczne zębów frezowano frezem walcowo - czołowym  $d = 6 \text{ mm}$  (rys. 3b,c). Do obróbki dna wrębu zastosowano frez kulisty  $d = 5 \text{ mm}$ , który odwzorował promień krzywej przejściowej (rys. 3d). Aby uzyskać wysoką dokładność zarysu obróbkę wykończeniową powierzchni bocznych zęba wykonano w dwudziestu przejściach. Ostatnim etapem było wykonanie fazowania ostrych krawędzi głowy zęba.



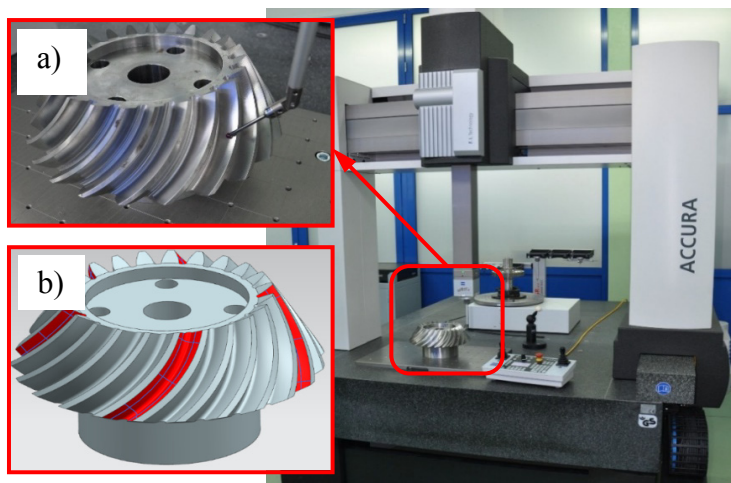
Rys. 4. Pięcioosiowe centrum obróbkowe DMU 100 monoBLOCK

Tab. 1. Warunki realizacji badań

Obróbka	Zgrubna	Kształtująca		Wykończeniowa		Fazowanie
				boków zęba	dna wrębu	
Frez	walcowo - czołowy	walcowo - czołowy	walcowo - czołowy	walcowo - czołowy	kulisty	fazownik
Średnica freza, liczba zębów	$d = 8 \text{ mm}$ , $z = 5$	$d = 6 \text{ mm}$ , $z = 5$	$d = 4 \text{ mm}$ , $z = 5$	$d = 6 \text{ mm}$ , $z = 5$	$d = 5 \text{ mm}$ , $z = 3$	$d = 10 \text{ mm}$ , $z = 5$
Prędkość skrawania, $v_c$ [m/min]	220	220	200	265	200	120
Prędkość obrotowa, $n$ [obr/min]	8800	11670	16000	14000	13000	12000
Posuw na ostrze, $f_z$ [mm/z]	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,1
Prędkość posuwu, $v_f$ [mm/min]	1760	1870	1800	2800	1300	4800
Szerokość skrawania, $a_e$ [mm]	8	6	4	0,35	5	0,1
Głębokość skrawania, $a_p$ [mm]	8	3,2	2	0,8	2,5	0,1

### 3. POMIAR DOKŁADNOŚCI ZARYSU I LINII ZĘBA

Pomiary dokładności zarysu i linii zęba koła zębatego dokonano na współrzędnościowej maszynie pomiarowej CMM Accura II wyposażonej w głowicę skanującą VAST XT (rys. 5) i oprogramowanie Calypso ver 5.20.



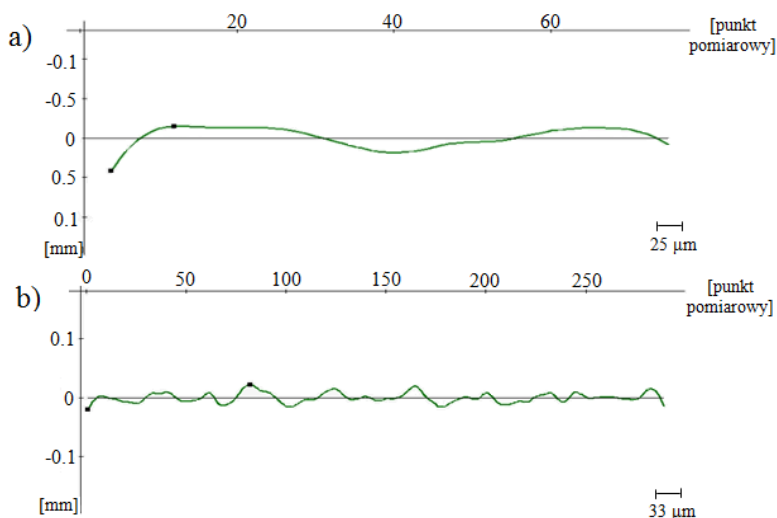
Rys. 5. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa CMM Accura II: a) głowica skanująca VAST XT, b) model 3D- CAD wykonywanego koła zębatego

W celu wykonania właściwej strategii pomiaru linii i zarysu zęba koła, posłużono się modelem 3D-CAD opracowanym w oprogramowaniu NX 9, na podstawie geometrii pochodzącej z programu GearMILL. W oprogramowaniu NX 9 na powierzchniach bocznych zęba wyznaczono linie, które powstały w wyniku przecięcia boków zęba i stożka podziałowego, oraz linie zarysu zęba prostopadłe do wyznaczonej linii zęba, które rozmieszczono w trzech równych odległościach na szerokości wieńca koła zębatego. Według wyżej opisanej procedury wyznaczono pięć losowo wybranych wrębów międzyzębnych do pomiaru (rys. 5b). Tak przygotowany model został zastosowany do opracowania programu pomiarowego w Calypso na maszynie CMM Accura II ZEISS. Wykonanie programu pomiarowego polegało na wykorzystaniu techniki „przejmowania elementów pomiarowych” z modelu 3D-CAD, w tym przypadku *krzywych 3D*. Elementy pomiarowe *krzywej 3D* dla linii i zarysu zęba zostały przejęte z modelu jako nominalne krzywe i programowane parametrami pomiaru przedstawionymi w tab. 2.

Tab. 2. Parametry pomiaru

Parametr pomiaru	Linia zęba	Zarys zęba
Prędkość pomiaru	3 mm/s	3 mm/s
Krok pomiaru	0,36 mm	0,2 mm
Liczba punktów pomiarowych	290	75
Trzpień pomiarowy	d = 3 mm	d = 3 mm
Dopasowanie	wg Gaussa	wg Gaussa
Kasowanie punktów nietypowych	wewnątrz CM-3; poza CM-3	wewnątrz CM-3; poza CM-3
Aproksymacja	0,42	0,42

Otrzymane wyniki z pomiarów *krzywych 3D* zostały zmierzone charakterystyką *kształt krzywej*, która określa wartości odchyłek w odniesieniu do krzywych nominalnych przejętych z modelu 3D-CAD (rys. 6).



Rys. 6. Przykładowe pomiary odchyłek: a) zarysu zęba, b) linii zęba

Wyniki odchyłek kształtu dla zmierzonych krzywych zostały umieszczone w tab.3. Odchyłki kształtu zarysu zęba są wynikiem uśrednienia trzech pomiarów zarysu, które przeprowadzono dla każdego badanego boku zęba. Dla badanego koła zębatego największa odchyłka kształtu linii zęba wynosiła  $49,8 \mu\text{m}$ , zaś średnia wartość  $45,6 \mu\text{m}$ . Największa odchyłka kształtu zarysu zęba wynosiła  $51,8 \mu\text{m}$ , a średnia odchyłka z wszystkich wyników  $43,2 \mu\text{m}$ . Zarówno odchyłki linii zęba jak również zarysu cechują się powtarzalnością.

Tab. 3. Odchyłki linii i zarysów zęba

Lp.	Nazwa parametru	Odchyłka kształtu [mm]	
		Strona lewa	Strona prawa
1.	Linia zęba I	0.054	0.0399
2.	Linia zęba II	0.0486	0.0483
3.	Linia zęba III	0.0425	0.0491
4.	Linia zęba IV	0.0469	0.0312
5.	Linia zęba V	0.0498	0.0455
1.	Zarys zęba I (średnia 3 pomiarów)	0.0459	0.0454
2.	Zarys zęba II (średnia 3 pomiarów)	0.0409	0.0347
3.	Zarys zęba III (średnia 3 pomiarów)	0.0402	0.0516
4.	Zarys zęba IV (średnia 3 pomiarów)	0.0331	0.0512
5.	Zarys zęba V (średnia 3 pomiarów)	0.0404	0.0482



#### 4. WNIOSKI

Dla wykonanego przykładu koła stożkowego dokładność wykonania linii zęba dla strony lewej mieściła się w przedziale od 0,0425 mm do 0,054 mm, a dla strony prawej od 0,0312 mm do 0,0491 mm. Dokładność wykonania zarysu zęba dla strony lewej mieściła się w przedziale od 0,0331 mm do 0,0459 mm, zaś dla strony prawej od 0,0347 mm do 0,0516 mm. Przeprowadzone pomiary potwierdziły możliwość wykorzystania nowej technologii obróbki kół zębatych oraz uniwersalnego centrum obróbczego do wytwarzania stożkowych kół zębatych. Dedykowane oprogramowanie wspomagania procesu wytwarzania GearMILL pozwoliło dokładnie odtworzyć geometrię zęba i zaprogramować obróbkę, co przełożyło się na wyniki pomiarów. Na otrzymane wyniki znaczący wpływ miało zastosowanie podstawy dystansującej przedmiot obrabiany. W celu zwiększenia dokładności wykonania zarysu i linii zęba koła zębatego powinno się przeprowadzić dalsze badania uwzględniając zmianę parametrów obróbki, średnic narzędzi, systemu mocowania przedmiotu obrabianego. W celu określenia klasy dokładności koła stożkowego systemu Klingelberg Cyclo-Paloid powinno się przeprowadzić badania wg wymagań dotyczących przylegania zębów, szerokości zęba i luzu bocznego. Dedykowane metody produkcji kół stożkowych cyclo-paloid: metody Oerlikona i Klingelberga wymagają stosowania specjalizowanych obrabiarek oraz narzędzi specjalnych. Alternatywna metoda przedstawiona w niniejszym artykule umożliwia wykorzystanie uniwersalnych obrabiarek i uniwersalnych narzędzi do produkcji szerokiej gamy kół stożkowych o różnych modułach i średnicach i może być zastosowana w produkcji jednostkowej i małoseryjnej.

#### LITERATURA

- [1] BUREK J., PŁODZIEN M., TUREK P., GDULA M., ŻURAWSKI K., *Wieloosiowe kształtowanie stożkowych kół zębatych w systemie NX*, Mechanik, nr 02/2014.
- [2] KAWASAKI K., TSUJI I., ABE Y., GUNBARA H., *Manufacturing method of large-sized spiral bevel gears in cyclo-paloid system using multi-axis control and multi-tasking machine tool*, Gear Technology, 08/2011, 56-61.
- [3] OCHĘDUSZKO K., *Koła zębate – konstrukcja*, Tom I, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1985, 211–282.
- [4] SUH S.H., JIH W. S., HONG H. D., CHUNG D. H., *Sculptured surface machining of spiral bevel gears with CNC milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 833-850.
- [5] WÓJCIK Z., *Obrabiarki do uzębień kół stożkowych*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1993.