

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
 Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Modelowanie frezów krążkowych do obróbki wklęsło-wypukłych uzębień typu Nowikowa

Modeling the Disk-Type Milling Cutters for Convexo-Concave Novikov Gears Machining

MICHAŁ BATSCH*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.545

W pracy przedstawiono sposób modelowania frezów krążkowych do obróbki wklęsło-wypukłych uzębień typu Nowikowa. Przedstawiona dyskretna metoda CAD wyznaczania sprzężonego zarysu powierzchni działania narzędzia posłużyła do zweryfikowania matematycznego modelu obróbki kształtowej tego typu uzębień. Ponadto opisano przebieg modelowania frezu na przykładzie frezu do obróbki uzębienia wypukłego. Zaprojektowane w ten sposób narzędzia zostały wykonane.

SŁOWA KLUCZOWE: frez kształtowy, koła zębate Nowikowa, wklęsło-wypukły zarys zębów.

Paper presents the method of modeling the disk-type milling cutters for Novikov convexo-concave gears machining. Presented discrete CAD-based method of obtaining the conjugate profile of surface of action of tool was used to validate the mathematical model of form machining of such kind of gears. Moreover the modeling process was illustrated on the example of milling cutter for convex teeth profile machining. The designed milling cutters were manufactured.

KEYWORDS: formed cutter, Novikov gears, convexo-concave tooth profile.

Wprowadzenie

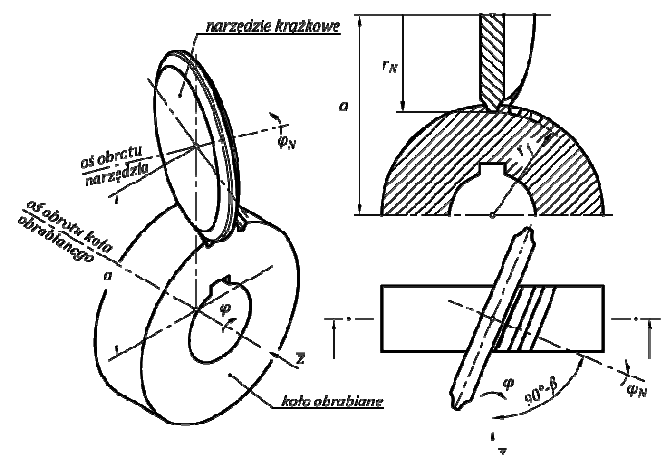
Wklęsło-wypukłe uzębienie typu Nowikowa może być obrabiane zarówno metodami obwiedniowymi jak też kształtowymi. Do metod obwiedniowych zaliczyć można dłutowanie metodą Maaga lub Fellowsa oraz frezowanie obwiedniowe. Metody kształtowe to między innymi frezowanie frezem krążkowym lub trzpieniowym. Przekładnie zębate Nowikowa wykazują teoretycznie większą nośność na naciski od przekładni ewolwentowych [1, 2]. Ponadto są bardzo wrażliwe

na błąd rozstawienia osi kół [2, 4]. Dlatego też aby zapewnić wymaganą nośność przekładni Nowikowa jej parametry należy dobierać pod kątem konkretnego zastosowania. Z powyższych względów koniecznym jest projektowanie narzędzi dedykowanych do obróbki konkretnej pary zębatej. Ponadto ze względu na kształt zębów zazwyczaj wymagane są dwa narzędzia – wklęsłe do obróbki uzębienia wypukłego oraz wypukłe do obróbki uzębienia wklęsłego.

Niniejszy artykuł przedstawia proces modelowania frezów krążkowych do obróbki walcowych kół zębatach o wklęsło-wypukłym zarysie typu Nowikowa z jedną linią styku.

Kinematyka obróbki

Podczas kształtowej obróbki uzębienia narzędziem krążkowym kształt wrębu uzyskiwany jest w wyniku złożenia ruchu obrotowego koła obrabianego względem swojej osi oraz ruchu posuwowego koła obrabianego względem narzędzia (Rys. 1).



Rys. 1. Kinematyka kształtowej obróbki uzębienia narzędziem krążkowym

*mgr inż. Michał Batsch (mbatsch@prz.edu.pl)

Oś obrotu narzędzia jest oddalona od osi obrabianego koła o wielkość $a=r_N+r_f$, w której: r_N to promień narzędzia, r_f to średnica stóp koła obrabianego. Ponadto kąt pomiędzy osią obrotu narzędzia, a osią koła obrabianego wynosi $90^\circ - \beta$ gdzie β to kąt pochylenia linii zęba na walcu podziałowym (dla prostej linii zęba $\beta=0$). Ruch posuwowy koła obrabianego reprezentowany przez wektor przesunięcia \bar{z} oraz jego ruch obrotowy opisany kątem φ związane są ze sobą poniższą zależnością

$$z = \varphi r \operatorname{ctg} \beta \quad (1)$$

gdzie r to promień podziałowy koła obrabianego.

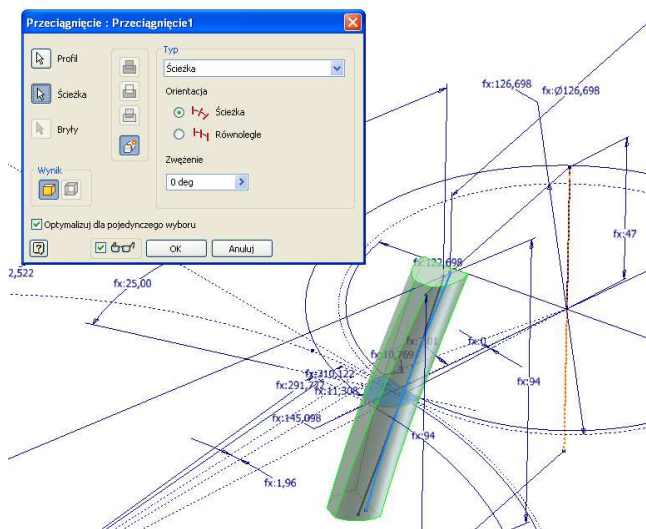
Rysunek 1 przedstawia obróbkę uzębienia o prawej linii zęba. W przypadku lewej linii zęba narzędzie musi zostać pochylone w przeciwną stronę, a obrót koła musi nastąpić w przeciwnym kierunku.

W rzeczywistości kinematyka obróbki może się różnić od zaprezentowanej na rysunku 1 przy czym zawsze koło obrabiane wykonuje ruch śrubowy (jednoczesny posuw i obrót) względem narzędzia (np. może się zdarzyć, że koło obrabiane wykonuje jedynie ruch obrotowy, a narzędzie posuwowy).

Wyznaczanie sprzężonych zarysów narzędzi krążkowych w systemie CAD

Sprzężony z obrabianym kołem zębatym zarys narzędzi może zostać wyznaczony w sposób analityczny [3] przy wykorzystaniu kinematycznej teorii zazębienia [5, 7] lub w sposób dyskretny przy pomocy bezpośredniej symulacji obróbki w systemie CAD [8]. Metoda ta użyta do modelowania kół zębatych została wykorzystana w pracach [6, 9]. W niniejszym artykule przedstawiono jej modyfikację polegającą na wykonywaniu dyskretnych ruchów wynikających z kinematyki obróbki kół oraz każdorazowym odejmowaniu w systemie CAD od bryły narzędzia bryły koła zębatego o idealnej geometrii.

Koła zębate o zarysie Nowikowa zostały zamodelowane wg matematycznego modelu [2, 4] poprzez „wyciągnięcie” łuku okręgu wzdłuż linii śrubowej (Rys. 2).



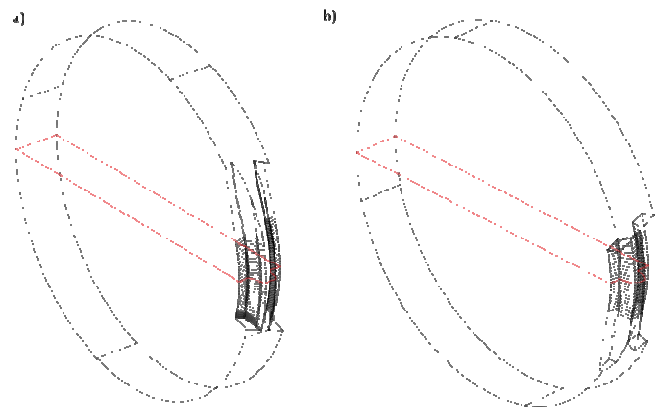
Rys. 2. Modelowanie kół zębatych Nowikowa o idealnej geometrii na przykładzie koła o zębach wypukłych

Dane pary zębatej, dla której wyznaczano sprzężone zarysy powierzchni działania narzędzia przedstawiono w tabeli 1

Tab. 1. Parametry kół zębatych o wklęsło-wypukłym zarysie typu Nowikowa

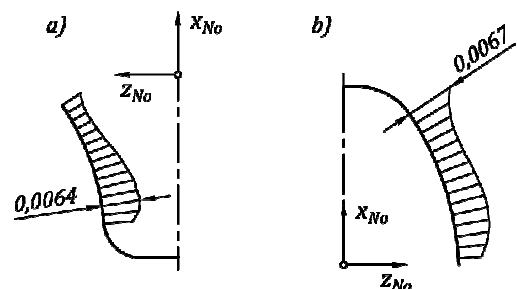
	Zębniak	Koło
Moduł normalny [mm]	$m_n = 3$	
Liczba zębów [-]	$z_1 = 30$	$z_2 = 47$
Poskokowy wskaźnik przyporu [-]	$\varepsilon_\beta = 1,2172$	
Szerokość wieńca [mm]	$b = 30$	
Kąt pochylenia linii zęba [°]	$\beta = 22,48$	
Normalny kąt przyporu [°]	$\alpha_n = 20$	
Przesunięcie zarysu zęba wklęsłego [mm]	$d_{co} = 0$	
Zarys	wypukły	wklęsły
Promień zarysu [mm]	$\rho_1 = 6,33$	$\rho_2 = 6,55$
Średnica podziałowa [mm]	$d_1 = 97,40$	$d_2 = 152,59$
Średnica wierzchołków [mm]	$d_{a1} = 104,30$	$d_{a2} = 152,59$
Średnica stóp [mm]	$d_{f1} = 95,30$	$d_{f2} = 143,59$

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji dla narzędzia krążkowego do obróbki uzębień przekładni o danych z tabeli 1.



Rys. 3. Trójwymiarowe modele narzędzi uzyskane w wyniku dyskretniej metody CAD: a) narzędzie do obróbki uzębienia wklęsłego, b) narzędzie do obróbki uzębienia wypukłego

W celu uzyskania jedynie zarysu narzędzia nie jest konieczne przeprowadzanie symulacji w pełnym zakresie jego kąta obrotu. Wystarczy pewien zakres, umożliwiający wyznaczenie szukanego zarysu (kolor czerwony Rys. 3.). Po wyznaczeniu zarysów narzędzi zostały one interpolowane łukami okręgów. Rysunek 4 przedstawia różnice pomiędzy zarysami narzędzi wyznaczonymi metodą analityczną [3] oraz metodą CAD po interpolacji łukami okręgów.



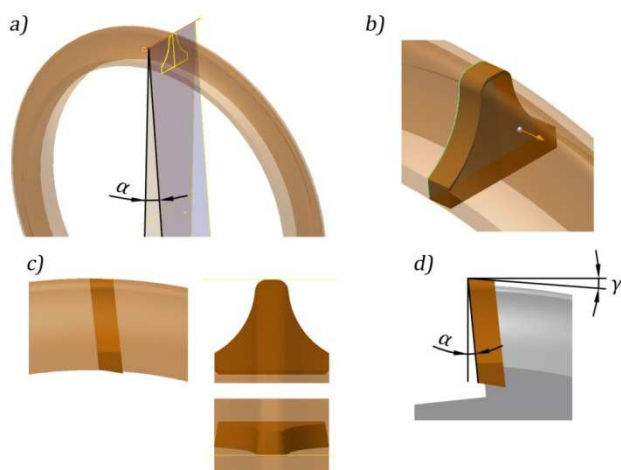
Rys. 4. Różnice pomiędzy zarysami narzędzi wyznaczonymi metodą analityczną [3] oraz metodą CAD: a) zarys narzędzia do obróbki uzębienia wypukłego, b) zarys narzędzia do obróbki uzębienia wklęsłego

Różnice te przedstawiono jako odległości wzdłuż wektora normalnego do zarysu narzędzia. W przypadku zarysu narzędzia do obróbki uzębienia wypukłego największa różnica wyniosła 0,0064mm. W przypadku zarysu narzędzia do obróbki uzębienia wklęsłego wyniosła ona 0,0067mm. W obydwu przypadkach różnice są niewielkie i nie przekraczają tolerancji wykonania samego frezu oraz koła zębatego. Wynikają one z przybliżenia zarysu uzyskanego metodą CAD łukiem okręgu oraz z błędów obliczeń numerycznych [3] wynikających z przyjętych kroków dyskretyzacji.

Projekt narzędzi

Narzędzia zostały zaprojektowane jako frezy krążkowe o lutowanych płytach skrawających z węglików spiekanych. Zarys narzędzi został wyznaczony za pomocą metody opisanej w pracy [3] zweryfikowanej w rozdziale 3. W celu uproszczenia przyjęto, że narzędzie jest bryłą obrotową, co ma miejsce w przypadku ściernicy. W przypadku frezu muszą występować kąty natarcia oraz przyłożenia. Frezowany kształt uzyskiwany jest w wyniku obrotu krawędzi skrawającej wokół osi narzędzia. W ten sposób odwzorowywana jest powierzchnia działania narzędzia, która została wcześniej wyznaczona. Poniżej przedstawiono tok postępowania w przypadku projektowania w systemie CAD frezów krążkowych do obróbki uzębienia na przykładzie frezu do obróbki wypukłego uzębienia Nowikowa.

Rysunek 5 przedstawia kolejne operacje w systemie CAD jakie należy przeprowadzić aby zamodelować frez. W pierwszej kolejności należy zamodelować powierzchnię działania narzędzia jako powierzchnię obrotową opisaną zarysem wcześniej wyznaczonym. Dla omawianego przypadku zarys ten przedstawiono na rysunku 4a. Następnie dokonuje się przekroju tej powierzchni płaszczyzną nachyloną do płaszczyzny uprzednio wyznaczonego zarysu pod kątem natarcia narzędzia (Rys. 5a). W dalszej kolejności dokonuje się „wyciągnięcia prostego” uzyskanego przekroju (Rys. 5b). Długość wyciągnięcia odpowiada grubości użytej płytki. Ostatnim etapem jest pochylenie powierzchni płytki skrawającej o kąt przyłożenia zwiększony o kąt natarcia oraz zamodelowanie osadzenia płytki (Rys. 5c)



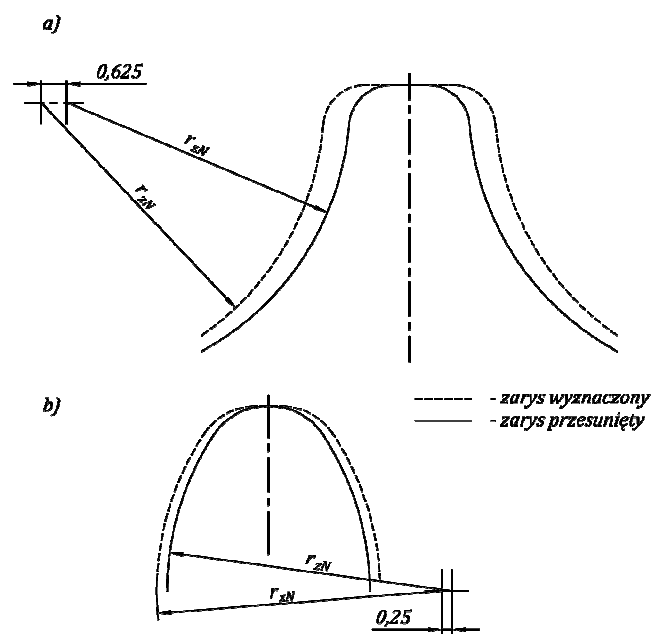
Rys. 5. Kolejne etapy modelowania frezu: a) przekrój powierzchni działania narzędzia płaszczyzną nachyloną o kąt natarcia, b) wyciągnięcie proste, c) pochylenie powierzchni płytki o kąt przyłożenia zwiększony o kąt natarcia, d) płytki osadzone w korpusie oraz kąt natarcia α i kąt przyłożenia γ

Trójwymiarowe modele CAD narzędzi przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Trójwymiarowe modele CAD frezów krążkowych do obróbki uzębienia typu Nowikowa

W omawianych w pracy [4] i w niniejszym artykule metodach wyznaczania zarysu narzędzi zakładano jednoczesną obróbkę dwóch sąsiadujących powierzchni bocznych zębów. W praktyce aby móc kontrolować wielkość luzu międzyzębnego, a co za tym idzie szerokość wrębu międzyzębnego frezy wykonano o nieco mniejszej szerokości niż wynikało to z przeprowadzonych obliczeń co zostało pokazane na rysunku 7.



Rys. 7. Przesunięcie zarysu narzędzi: a) narzędzie do obróbki uzębienia wypukłego, b) narzędzie do obróbki uzębienia wklęsłego

Zmiana szerokości polega na nieznacznym przesunięciu środka łuku okręgu stanowiącego zarys frezu. W przypadku frezu zębniaka przesunięcie to wyniosło 0,625mm, a w przypadku frezu koła 0,25mm. Ponadto przesunięcie to umożliwia obróbkę uzębienia ze zmianą kąta pochylenia linii zęba. Wówczas możliwe jest wprowadzanie modyfikacji w postaci fazowania bądź beczułkowania o ile kinematyka obrabiarki na to pozwala. Rysunek 8 przedstawia wykonane frezy do obróbki kół przekładni Nowikowa.



Rys. 8. Frezy krążkowe dedykowane do obróbki kształtowej uzębień walcowej przekładni wklęsło-wypukłej Nowikowa

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono sposób modelowania frezów krążkowych do obróbki wklęsło-wypukłych uzębienia typu Nowikowa. Zaprezentowany sposób wyznaczania sprzężonego zarysu powierzchni działania narzędzia w systemie CAD jest zbieżny z metodą analityczną [3]. Na tej podstawie można wnioskować o poprawności przyjętej geometrii narzędzia. Ponadto sposób ten może zostać wykorzystany do projektowania zarówno frezów jak i ściernic. Prezentowana dyskretna metoda oparta na systemie CAD jest czasochłonna, co wynika z konieczności przeprowadzenia wielu operacji boolowskich. Analityczna metoda wyznaczania zarysu jest dużo szybsza. Z tego też względu metoda analityczna może znaleźć zastosowanie przy tworzeniu aplikacji do projektowania tego typu narzędzi. Istotną zaletą dyskretnego metody CAD jest bezpośrednia wizualizacja procesu generowania uzębienia [6, 8, 9] bądź narzędzia. Z tego względu została ona wykorzystana w celu weryfikacji przyjętego matematycznego modelu obróbki kształtowej [3].

Podziękowania

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. Batsch M., Homik W., Markowski T.: "Cylindrical Gears with Increased Contact Area – Proposal of Application in Watercrafts Power Transmission Systems" *Solid State Phenomena* 236 (2015) s. 26-30
2. Batsch M., Markowski T.: "Analysis of the Contact Region Geometry of the Novikov Convexo-Concave Gears" *Konferencja AIRTEC*, Frankfurt 05.11-07.11.2013,
3. Batsch M., Markowski T.: "Matematyczny model obróbki kształtowej uzębienia o kołowo-lukowym zarysie zębów typu Nowikowa" *XIX Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Przekładnie Zębate i XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Koła Zębate KZ*, Wisła 25.11-27.11.2014
4. Batsch M., Markowski T.: "Tooth Contact Analysis of Novikov Convexo-Concave Gears" *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 39 (2015)1
5. Litvin F. L., Fuentes A.: *"Gear Geometry and Applied Theory"* Cambridge University Press, 2004.
6. Marciniec A., Sobolewski B.: "Zastosowanie systemu Autodesk Inventor do symulacji współpracy przekładni stożkowych Gleasona" *Mechanik* 1/2012

7. Radzewich S.P.: *"Gear Cutting Tools. Fundamentals of Design and Computation"* CRC Press 2010.
8. Sobolak M.: *"Analiza i synteza współpracy powierzchni kół zębatych metodami dyskretnymi"* Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
9. Sobolak M.: "Bezpośrednia numeryczna symulacja kształtowania uzębienia kół przekładni stożkowych typu Gleason o kołowo-lukowej linii zęba" *Archives of Mechanical Technology and Automation* (2001), s187÷196.