

Mieczysław PŁOCICA, Grzegorz BUDZIK
Politechnika Rzeszowska

PROJEKTOWANIE NOWYCH RODZAJÓW PRZEKŁADNI ZĘBATYCH O NIETYPOWYCH ZARYSACH ZĘBÓW Z UŻYCIEM TECHNIK CAD ORAZ RP

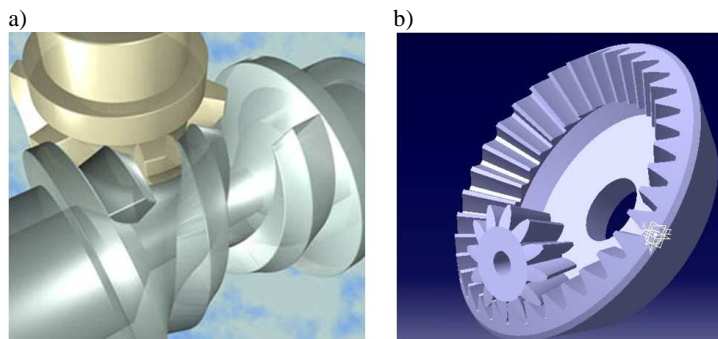
W artykule przedstawiono wstępną ocenę nowego zarysu uzębienia na podstawie symulacji jego nacinania w systemie CAD. Opisano proces tworzenia wirtualnego narzędzia oraz kół przekładni. Wykonano symulację nacinania kół zębatach o zarysie ewolwentowym i sinusoidalnym. Kolejnym krokiem było wykonanie przekładni z użyciem techniki 3DP. Wskazano na potencjalnie większą wytrzymałość kół o zarysie nacinanym krawędzią sinusoidalną w porównaniu z nacinaniem zarysem ewolwentowym.

Słowa kluczowe: koła zębata, wirtualna obróbka, symulacje CAD, techniki RP

Wstęp

W ostatnich latach, w związku z intensywnym rozwojem technik komputerowych i programów, stało się powszechne wykorzystanie CAD i RP w projektowaniu nowych konstrukcji mechanicznych, w tym przekładni zębatach [1, 3÷6]. Tworząc modele wirtualne kół przekładni oraz symulując ich współpracę, można wnioskować o praktycznej przydatności nowego rozwiązania konstrukcyjnego oraz podjąć decyzję o celowości dalszych prac nad nim. Niektóre prace nad nowymi koncepcjami przekładni zębatach lub innych mechanizmów nie są w pierwszym etapie poparte głębszymi rozważaniami teoretycznymi, ponieważ głównym celem jest jedynie szybkie sprawdzenie możliwości działania tworzonego zespołu. Wykorzystuje się do tego szerokie możliwości symulacji wirtualnych w CAD, a dopracowanie teoretyczne konstrukcji następuje w wypadku uznania celowości jej wdrożenia praktycznego. Prace takie są prowadzone m.in. w ChRL, gdzie powstają np. nowe konstrukcje przekładni z kołami nieokrągłymi, których geometria jest oparta jedynie na symulacji nacinania obwiedniowego narzędziem o zdefiniowanym zarysie. W USA kilka nowych rozwiązań przekładni zębatach opatentował Lunin [6]. Przykłady wirtualnych modeli nietypowych przekładni przedstawiono na rysunku 1.

Celem artykułu jest zaprezentowanie metodyki tworzenia prototypowej przekładni walcowej o nietypowym zarysie z użyciem symulacji kształtowania uzębienia w systemie CAD oraz weryfikacja na modelu fizycznym, wykonanym techniką druku trójwymiarowego.



Rys. 1. Model wirtualny przekładni ultragloboidalnej (a) [6] oraz przekładni stożkowej o zazębieniu wewnętrznym (b) [3]

Fig. 1. Virtual model of ultragloboidal worm gear (a) [6] and bevel internal gear (b) [3]

Metodyka uzyskania nowego zarysu uzębienia

Koncepcja nowego zarysu zębów przekładni walcowej zakładała ich nacięcie sinusoidalną krawędzią skrawającą. Założenie to wynikało z prostej możliwości wygenerowania takiej krawędzi na drodze matematycznej i przybliżenia jej w systemie CAD. Przed stworzeniem zarysu narzędzia sinusoidalnego wykonano symulację nacinania zarysu ewolwentowego zębatką o prostoliniowej krawędzi skrawającej. Symulację kształtowania zarysu w układzie dwuwymiarowym przeprowadzono na podstawie metody Magga z tą różnicą, że otoczka koła zębatego była nieruchoma, a narzędzie skrawające wykonywało wszystkie ruchy związane z odtaczaniem. Zarówno półfabrykat, jak i narzędzie – zębatka są elementami płaskimi leżącymi na tej samej płaszczyźnie, usytuowanymi odpowiednio względem siebie i głównego układu współrzędnych. Nacinanie polega na skopiowaniu zarysu zębatki i przesunięciu jej kopii w położenie pomocnicze, gdzie następuje jej obrót przyrostowo o zadany kąt, a następnie przesunięciu o dx oraz dy tak, aby przyjęła położenie zgodne z ruchem odtaczania. Po tej operacji następuje ponowne przesunięcie zarysu zębatki i usytuowanie jej na półfabrykacie, a następnie odjęcie części wspólnej dla otoczki i zębatki od materiału otoczki. Cykl czynności jest powtarzany z przyrostem kąta obrotu i przyrostem przesunięć dx i dy , powiązanych z kątem obrotu zależnościami:

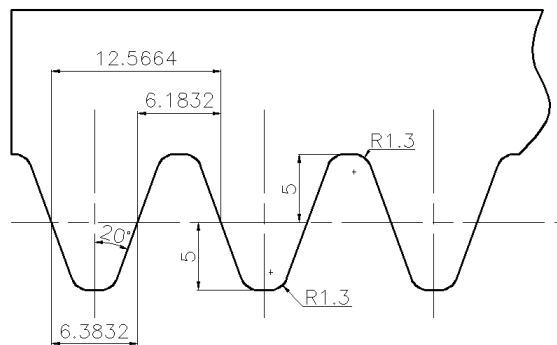
$$\left. \begin{aligned} dx &= r \cdot \sin \varphi - r \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \\ dy &= r \cdot \cos \varphi + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi - r \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Należy zwrócić uwagę, aby kąt obrotu nie przekraczał wartości -90° (podczas symulacji narzędzie obraca się w kierunku ujemnym), gdyż spowodowałoby to zmianę znaku funkcji sinus i w rezultacie wprowadziło błąd w programie. Z drugiej strony kąt obrotu musi być na tyle duży, aby możliwa była pełna obróbka dwóch sąsiednich wrębów, czyli jednego zęba. Częściowo obrobione koło zębate obraca się względem jego środka o kąt 72° i symulację przeprowadza się od nowa. Czynności te przeprowadza się do czasu, gdy całe koło zostanie obrobione.

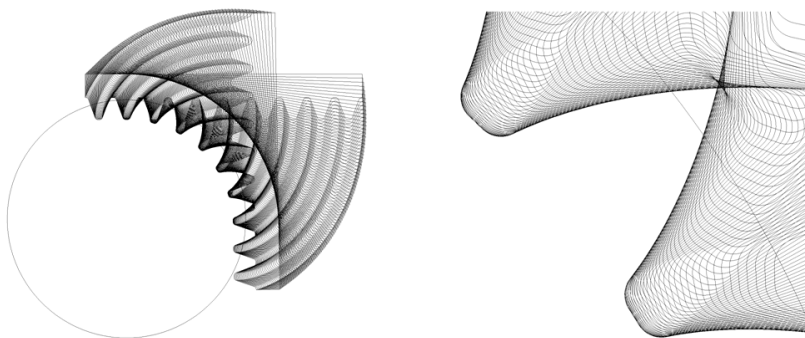
Drugim sposobem na uzyskanie koła zębatego jest przeprowadzenie symulacji tylko do tego stopnia, kiedy dwa sąsiednie wręby zostaną w pełni obrobione. Uzyskany w ten sposób ząb należy skopiować i ustawić w szyku kołowym względem środka okręgu podziałowego. Na rys. 2. przedstawiono dwuwymiarowy model zębatki, użyty do wykonania wirtualnych kół o zarysie ewolwentowym [2] w procesie symulacji obróbki (rys. 3.). Na podstawie geometrii tych kół oraz zębatki uzyskano niektóre dane geometryczne do stworzenia narzędzia o sinusoidalnej krawędzi skrawającej.

Rys. 2. Wymiary zębatki do naciągania uzębień ewolwentowych (dla $m = 4$)

Fig. 2. Dimensions of toothed bar for generating involute gears (for $m = 4$)

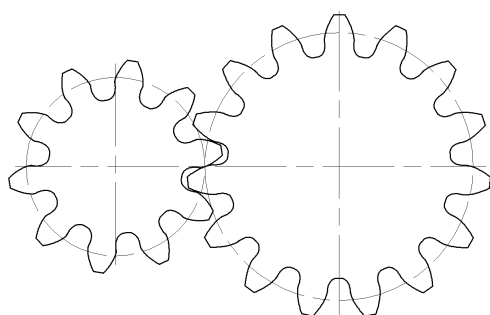


Do celów porównawczych z nowym zarysem wygenerowano przekładnię o zarysie ewolwentowym, o przełożeniu 1:1,5, w której zębnik ma 10 zębów, a koło 15, przy module 4. Na rysunku 4. przedstawiono zestawione ze sobą koła zębate $z_1 = 10$ oraz $z_2 = 15$. Wskutek małej liczby zębów obydwu kół (graniczna liczba zębów wynosi 17) koła są podcięte u podstawy. O ile w przypadku większego koła podcięcie to jest nieznaczne (dopuszczalne ze względu na $z_2 > z'_g = 14$), o tyle koło mniejsze jest podcięte zbyt mocno. Koło o liczbie zębów mniejszej od granicznej wybrano celowo, aby ocenić wrażliwość na podcięcie nowego zarysu.



Rys. 3. Obwiedniowe kształtowanie uzębienia oraz powiększenie zarysu zęba

Fig. 3. Enveloped generating of the gear teeth and magnification of the tooth profile



Rys. 4. Przekładnia o zarysie ewolwentowym: $z_1 = 10$, $z_2 = 15$, $m = 4$, koła niekorygowane

Fig. 4. Gear with the involute profile: $z_1 = 10$, $z_2 = 15$, $m = 4$, non-corrected wheels

Kolejnym krokiem do stworzenia nowego zarysu uzębienia było stworzenie narzędzia – zębatki o sinusoidalnej krawędzi skrawającej (rys. 5.). Modyfikując równanie sinusoidy $y = \sin(x)$ przez wprowadzenie do niego modułu koła zębatego m , uzyskano krzywą o amplitudzie równej wartości $A_{\max} = h_a = h_f = 1,25 \cdot m_n$ oraz okresie $T = p = \Pi \cdot m$. Równanie sinusoidy przyjęło zatem postać:

$$y = 1,25 \cdot m \cdot \sin(360 \cdot x / \Pi \cdot m) \quad (2)$$

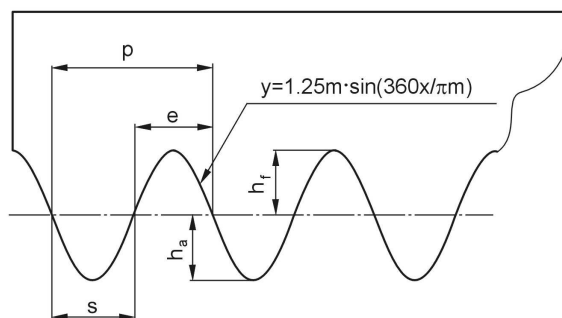
Następnie wykres funkcji został przybliżony krzywą typu spline, a w programie AutoCAD i z jego pomocą zostało utworzone narzędzie – zębatka.

W utworzonym narzędziu nie wzięto pod uwagę luzu obwodowego ($s = e$), dlatego nacięte nim koła zębate będą współpracować obydwoma stronami zęba. Kolejnym krokiem jest uzyskanie narzędzia, w którym uwzględniony byłby luz obwodowy (rys. 6.). W tym celu zwiększono grubość zęba narzędzia i odpowiednio zmniejszono jego wrąb (w praktyce rozsunięto o odpowiednią wartość

krawędzie stanowiące zarys zęba). Następnie dokonano nieznacznej modyfikacji głowy i stopy zębatki, jednak modyfikacja ta zawiera się w przyjętym luzie wierzchołkowym, natomiast kształt krawędzi skrawającej nie uległ zmianie (jedyną zmianą było zatem zwiększenie grubości zęba o wartość luzu obwodowego j oraz zmniejszenie szerokości wrębu o tę samą wartość). Wartość luzu obwodowego przyjęto tak samo jak dla kół ewolwentowych ($j = 0.05$ m). Narzędziem tym nacięto dwa koła zębate $z_1 = 10$ i $z_2 = 15$ o module $m = 4$, które zestawiono ze sobą w przekładnię konstrukcyjną (rys. 7.).

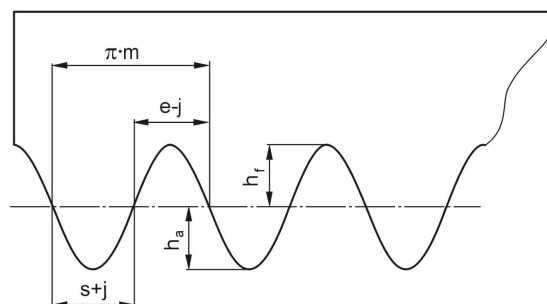
Rys. 5. Narzędzie – zębatka bez uwzględnionego luzu obwodowego

Fig. 5. Tool – toothed bar without taking into account circumferential backlash



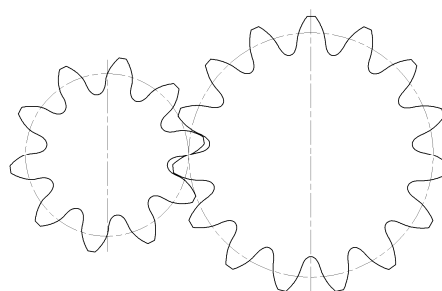
Rys. 6. Narzędzie – zębatka

Fig. 6. Tool – toothed bar



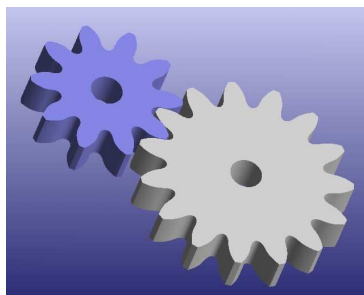
Rys. 7. Współpracująca para zębata ($z_1 = 10$, $z_2 = 15$, $m = 4$)

Fig. 7. Mating gear elements ($z_1 = 10$, $z_2 = 15$, $m = 4$)



Model fizyczny

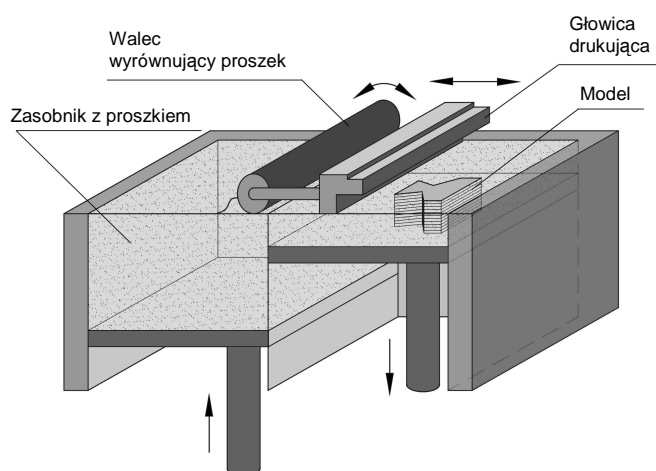
Modele bryłowe kół wykonano w programie AutoCAD, używając polecenia wyciągnięcia zarysu (rys. 8.). Otrzymane bryły zapisano w formacie STL, aby umożliwić ich odczyt przez program współpracujący z drukarką 3D.



Rys. 8. Model 3D przekładni o zarysie zęba naciętym sinusoidą

Fig. 8. 3D model of gear with the sinusoid cutted tooth

Modele fizyczne wykonano techniką drukowania przestrzennego (3D Printing – 3DP). Polega ona na warstwowym łączeniu sproszkowanego materiału za pomocą spoiwa nanoszonego przez głowicę drukującą. Proces drukowania rozpoczyna się naniesieniem warstwy proszku ze zbiornika uzupełniającego. Zmierzona ilość proszku jest dozowana za pomocą układu przesuwającego tłok w cylindrze urządzenia, a następnie rozprowadzana za pomocą walca na powierzchni platformy podmodelowej. Na przygotowaną warstwę proszku jest nanoszone spoiwo, zgodnie z założonym przekrojem poprzecznym bryły. Spoiwo wiąże sproszkowany materiał i w ten sposób powstaje warstwa modelu, po czym platforma robocza obniża się o grubość warstwy i cykl zostaje powtórzony (rys. 9.).



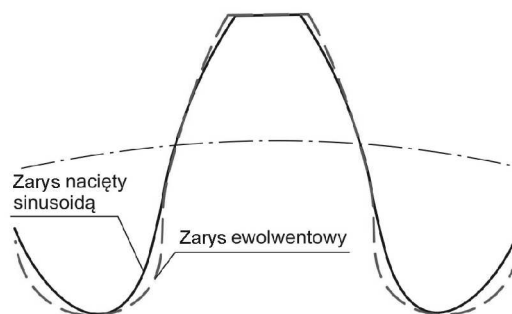
Rys. 9. Zasada tworzenia modelu metodą 3DP

Fig. 9. Forming principle of models by 3DP method

Niezwiązany proszek służy do podpierania tworzonego modelu. Po wykonaniu wszystkich warstw następuje podniesienie platformy z modelem i usunięcie niezwiązanego proszku. Zazwyczaj otrzymane modele są nasączone substancjami powodującymi zwiększenie ich wytrzymałości mechanicznej lub elastyczności. Materiałami stosowanymi do drukowania przestrzennego mogą być proszki metali i proszki ceramiczne oraz kompozytowe (metalowo-ceramiczne) zawierające krzemionkę koloidalną lub spoiwo polimerowe. Według producentów drukarek 3D można osiągnąć minimalną grubość warstwy $177\text{ }\mu\text{m}$, rozdzielczość $508\text{ }\mu\text{m}$ i dokładność wykonania $\pm 127\text{ }\mu\text{m}$. Do wykonania kół użyto drukarki Z 510 firmy Z Corporation.

Podsumowanie

Wstępne badania modeli przekładni pozwalają przypuszczać, że koła nacinane sinusoidalną krawędzią skrawającą będą mieć większą wytrzymałość niż koła ewolwentowe. Dla oceny celowości prac nad nowym zarysem porównano go z zarysem ewolwentowym. Na rysunku 10. przedstawiono obydwa zarysy uzębienia, przy czym jest widoczne łagodniejsze przejście krzywej boku zęba w dno wrębu dla zarysu naciętego krawędzią sinusoidalną. Wskazuje to na mniejszą wrażliwość na powstawanie podcięcia, tj. mniejszą graniczną liczbę zębów. Ujemnym zjawiskiem jest nieco mniejsza szerokość wierzchołka zęba.



Rys. 10. Porównanie zęba ewolwentowego i nacinanego sinusoidalną krawędzią skrawającą, naciętych na kołach o identycznych parametrach ($z = 15$, $m = 4$, $x = 0$)

Fig. 10. Comparison of the involute tooth and the tooth cutted by the sinusoidal edge on the wheels with identical parameters ($z = 15$, $m = 4$, $x = 0$)

Kolejnym czynnikiem wpływającym na pozytywną ocenę tego zarysu są wielkości poślizgów międzyzębnych. Wartości tych poślizgów są około 20%

mniejsze w kole o zębach nacinanych sinusoidalną krawędzią skrawającą niż przy zębach ewolwentowych. Wartość 20% oszacowano w następujący sposób:

- wydzielono krańcowy fragment linii przyporu o jednakowej długości dla obydwu zarysów (dla obydwu linii przyporu),
- dla wydzielonego odcinka przyporu porównano ze sobą długości odcinków współpracujących ze sobą zębów,
- otrzymane wyniki porównano ze sobą, określając w ten sposób procentową zależność poślizgów zarysu ewolwentowego względem nacinanego sinusoidalną krawędzią skrawającą.

Istotnymi wadami przedstawionego zarysu są natomiast:

- trudności związane z wykonaniem narzędzia skrawającego, a co za tym idzie – wysokie koszty jego uzyskania,
- krzywoliniowy kształt linii przyporu i związany z tym zmienny kąt przyłożonej do zęba siły.

Powyższe rozważania skłaniają do wniosku, że koła o zarysie naciętym sinusoidą mogą zastępować koła ewolwentowe, jednocześnie zapewniając większą wytrzymałość przekładni. Należy zauważyć, że podobny wniosek w odniesieniu do kół o zarysie sinusoidalnym sformułowano w Politechnice Lwowskiej, gdzie wykonuje się jednostkowo przekładnie z kołami sinusoidalnymi, używając konwencjonalnych obrabiarek o zmodyfikowanej kinematyce.

Wykonane metodą 3DP prototypowe koła posłużyły do wstępnej oceny praktycznej przydatności nowego zarysu uzębień. Dalsze wnioski będzie można sformułować po przebadaniu kół wykonanych z metalu.

Literatura

- [1] Budzik G., Sobolak M.: Prototypowanie kół zębatych z wykorzystaniem stereolitografii i odlewania próżniowego, OW PRz, Rzeszów 2004.
- [2] Ochęduszek K.: Koła zębate, t. I, Konstrukcja, WNT, Warszawa 2007.
- [3] Płocica M., Dziubek T.: Koncepcje konstrukcyjne przekładni stożkowych o zazębieniu wewnętrznym, ZN PRz, Mechanika, 75 (2008), 49-54.
- [4] Ślota J., Gajdoś I.: The application of rapid prototyping, CAE and CAM methods in product development processes, ZN PRz, Mechanics, 73 (2008), 251-256.
- [5] Sobolak M.: Bezpośrednia numeryczna symulacja kształtowania uzębienia kół przekładni stożkowych typu Gleason o kołowo-łukowej linii zęba, Arch. of Mech. Technol. Automat., 19 (2001), 133-140.
- [6] www.zakgear.com

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2009 jako projekt badawczy rozwojowy (R03 021 02).

DESIGN OF NEW CONCEPTIONS OF GEARS WITH ATYPICAL TOOTH PROFILE WITH CAD AND RP TECHNIQUES USING

The article presents the possibilities of preliminary valuation of new profile of gear teeth on the basis of cutting simulation in CAD system. It describes the creating process of virtual tool and gear wheels. For the comparative purposes the simulation of teeth cutting has been made for involutes and sinusoidal gears profiles. The next step of the research process was manufacturing of gears prototypes with 3DP methods. The results of CAD and RP models analysis show potentially higher strength of sinusoidal gears than involution gears.

Keywords: spur gears, virtual cutting simulation, CAD simulation, RP techniques

Złożono w Redakcji w listopadzie 2009 r.