

Dr inż. Mieczysław PŁOCICA  
[mplocica@prz.edu.pl](mailto:mplocica@prz.edu.pl)

Dr hab. inż. Adam MARCINIEC  
[amarc@prz.edu.pl](mailto:amarc@prz.edu.pl)

Dr inż. Jadwiga PISULA  
[jpisula@prz.edu.pl](mailto:jpisula@prz.edu.pl)

Mgr inż. Piotr POŁOWNIAK  
[ppolowniak@prz.edu.pl](mailto:ppolowniak@prz.edu.pl)

## DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA SYMULACJI OBRÓBK I WSPÓŁPRACY STOŻKOWYCH PRZEKŁADNI LOTNICZYCH

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono możliwości weryfikacji poprawności symulacji wirtualnych na fizycznie wykonanej przekładni. Weryfikacja ta ma na celu ocenę poprawności, zarówno modeli użytych do symulacji obróbki i współpracy, jak i wyników symulacji, tj. geometrii powierzchni bocznych zębów zębniaka i koła oraz wskaźników jakości współpracy (sumaryczny ślad współpracy bez obciążenia i pod obciążeniem, wykres nierównomierności przekazywania ruchu). Celem artykułu jest wykazanie, że zweryfikowane doświadczalnie symulacje mogą służyć do samodzielnego projektowania przekładni stożkowych, gwarantując uzyskanie prawidłowych wyników.

**Słowa kluczowe:** przekładnie stożkowe, symulacja obróbki, badania doświadczalne

## EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CUTTING AND MESHING SIMULATION OF THE AIRCRAFT BEVEL GEARS

**Summary:** The paper presents the possibility to experimental verification of the virtual simulation of bevel gears cutting and meshing. This verification is carried out to evaluate the accuracy of the models used for machining simulation and for gear and pinion mesh, as well as simulation results. The geometry of the teeth flank surfaces of the pinion and the gear must ensure a good quality of cooperation (total contact pattern without load and under load, motion graph). The purpose of this article is to show that the experimentally verified simulations can be used to design bevel gears, ensuring you get the correct results.

**Keywords:** bevel gears, cutting simulation, rig test

### 1. WPROWADZENIE

Przemysł lotniczy stawia nowym konstrukcjom najwyższe wymagania odnośnie ich jakości i bezpieczeństwa stosowania w statkach powietrznych. Nowe rozwiązania muszą być wszechstronnie sprawdzone w warunkach odpowiadających środowisku ich pracy. Dlatego każda nowo projektowana konstrukcja jest testowana, najpierw w środowisku wirtualnym na modelach zawierających cechy rzeczywistego wyrobu, a ostatecznie na fizycznych stanowiskach badawczych. Działania takie są podejmowane także w przypadkach zmian technologicznych, dotyczących już wytwarzanych komponentów.

Rozwój konstrukcji samolotów wymusza na producentach silników lotniczych zapewnienie w swoich konstrukcjach możliwości odbioru coraz większej mocy z silnika. Główne prace badawcze, związane z lotniczymi przekładniami stożkowymi obejmują zagadnienia związane z podwyższeniem wskaźników wytrzymałościowych oraz właściwości eksploatacyjnych przekładni. Z punktu widzenia wytwarzania istotne jest także

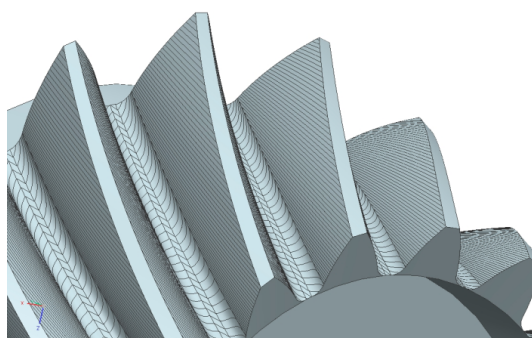
skrócenie czasu wdrażania do produkcji nowych przekładni, a także obniżenie kosztów produkcji i podniesienie wydajności obróbki. Ważne miejsce w badaniach zajmuje rozwój symulacyjnych metod numerycznych, wspomagających projektowanie konstrukcji i technologii przekładni [5, 6].

W projektowaniu geometrii kół stożkowych rozwijane są analityczne metody komputerowego generowania geometrii uzębienia. Uwzględniają one zarówno klasyczne modyfikacje geometrii zarysu i linii zęba jak też modyfikacje topologiczne, obejmujące wybrany obszar boku zęba. Numeryczne generowanie geometrii uzębienia i zazębienia jest ściśle związane z projektowaniem technologii [1, 7, 11], ponieważ podstawowym wskaźnikiem jakościowym przekładni stożkowych jest ślad współpracy zazębienia. Jego wielkość, kształt i położenie wynikają bezpośrednio z geometrii współpracujących boków zębów, która jest wynikiem ustawień obrabiarki i kinematyki procesu nacinania. Wraz ze śladem współpracy ocenia się topografię boku zęba przez porównanie jej z powierzchnią wzorcową. O kinematyce zazębienia informuje wykres nierównomierności przekazywania ruchu.

Zespoły naukowe Politechniki Rzeszowskiej i Politechniki Warszawskiej opracowały własny system wspomaganie projektowania przekładni stożkowych [1-4, 8, 9, 10, 11]. Ostatnim etapem oceny poprawności wykorzystanym w nim modeli nacinania oraz współpracy zazębienia, jest ich praktyczna weryfikacja za pomocą badań stanowiskowych i z użyciem maszyn przemysłowych (obrabiarka do kół stożkowych, współrzędnościowa maszyna pomiarowa).

## 2. WERYFIKACJA SYMULACJI NACINANIA UZĘBIENÍ

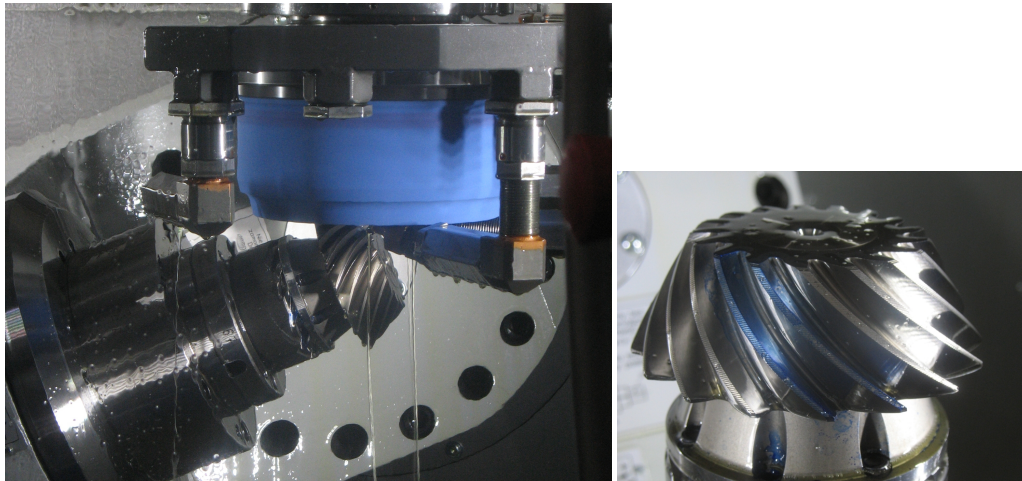
Opracowana bryłowa symulacja nacinania uzębienia w systemie CAD polega na stworzeniu modelu wirtualnej obrabiarki, zawierającej ruchome zespoły, których kinematyka odzwierciedla możliwości ruchowe współczesnej obrabiarki numerycznej Phoenix 175HC [2, 3]. Funkcje ruchu zadawane są w postaci wielomianów. Symulacja procesu obróbki w zadanym układzie technologicznym pozwala na otrzymanie bryłowych modeli koła i zębniaka, które powstają przez odejmowanie interferujących objętości narzędzia i obrabianej otoczki.



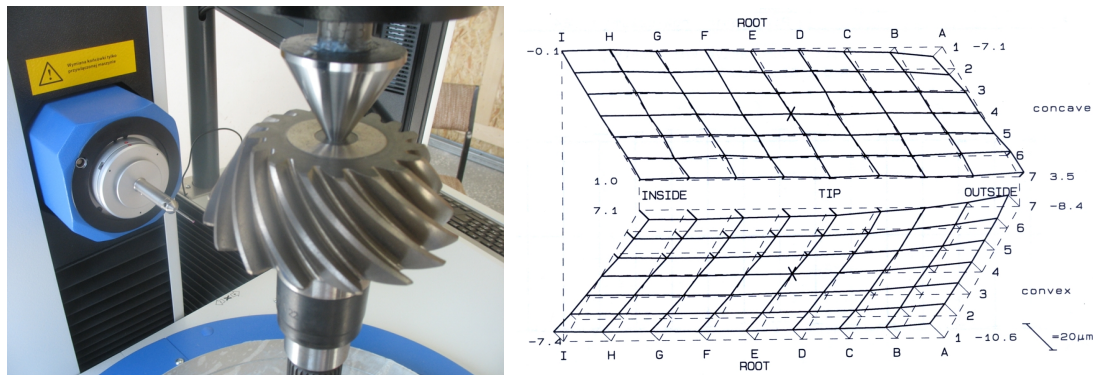
Rys. 2.1 Uzębienie bryłowego modelu zębniaka [12]

Uzyskaną geometrię powierzchni bocznych zębów weryfikuje się (po sprawdzeniu współpracy na modelach bryłowych i ew. wprowadzeniu korekt), aplikując użyte ustawienia na rzeczywistą obrabiarkę. Topografię naciętych uzębienia określa się na współrzędnościowej maszynie pomiarowej, a następnie porównuje z wczytaną topografią modeli wirtualnych, która jest traktowana jako wzorcowa. Użycie współrzędnościowej techniki pomiarowej jest w przypadku kół lotniczych niezbędne, z uwagi na wysokie klasy jakościowe szlifowanych uzębienia i związane z tym wąskie pola tolerancji wymiarowych i geometrycznych. Powierzchnia zmierzona wykazuje zazwyczaj odchyłki topografii w

stosunku do wzorca, co jest spowodowane naturalną, niewielką rozbieżnością między algorytmami środowiska CAD, a algorytmami sterowania obrabiarki. Próby przeprowadzone przez zespół autorski wykazały, że dla uzyskania wysokiej zgodności otrzymanej geometrii powierzchni bocznych zębów z powierzchnią wzorcową, konieczne jest najczęściej jednokrotne wprowadzenie korekt ustawczych do szlifowania uzębienia.



Rys. 2.2 Szlifowanie uzębienia oraz gotowy zębniak



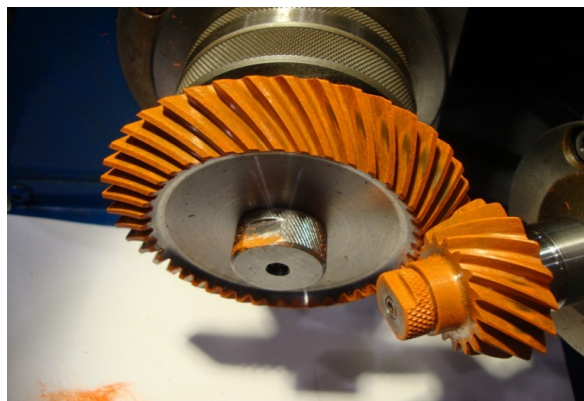
Rys. 2.3 Pomiar na maszynie współrzędnościowej oraz uzyskana topografia (przed korektą) nałożona na topografię wzorcową

### 3. WERYFIKACJA SYMULACJI WSPÓŁPRACY ZAZĘBIENIA

Najprostszą analizę śladu współpracy bez obciążenia w warunkach rzeczywistych przeprowadza się na maszynach kontrolnych (kontrolerkach), oceniając ślad współpracującej pary stożkowej, której zęby pokrywa się warstwą tuszu o określonej grubości (rys. 3.1). Na podstawie porównania odcisku uzyskanego w tuszu z posiadaną fotografią odcisku wzorcowego wprowadza się poprawki ustawień obrabiarki dla skorygowania geometrii uzębienia. Metoda ta jest powszechnie stosowana na życzenie niektórych odbiorców lotniczych kół stożkowych mimo istniejących możliwości symulacji współpracy w środowiskach CAD i MES.

Symulacja zazębienia w systemie CAD (Inventor) polega na wirtualnym ustawieniu pary stożkowej w położeniu współpracy oraz nałożeniu wiązań na powierzchni boczne stykających się zębów [2]. Jedną z powierzchni bocznych zostaje skopiowana i odsunięta o grubość tuszu, używanego do fizycznego sprawdzania współpracy. Następnie, z wykorzystaniem wprowadzonych wiązań, odbywa się odtaczanie powierzchni oraz

wyznaczanie iloczynu pogrubionej powierzchni i powierzchni zęba współpracującego. Efekt tej operacji pokazano na rys. 3.2.

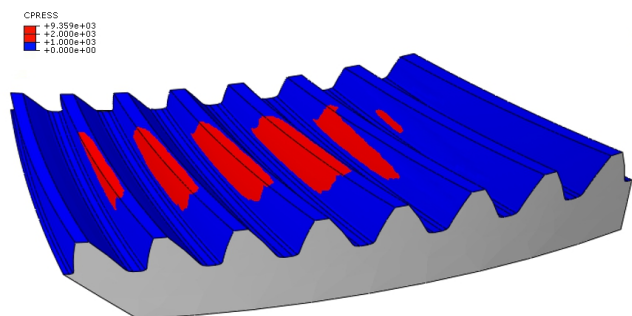


Rys. 3.1 Sumaryczny ślad współpracy bez obciążenia, otrzymany na kontrolerze



Rys. 3.2 Sumaryczny ślad współpracy bez obciążenia, otrzymany na modelu bryłowym w systemie Inventor [2]

Ślad współpracy pod obciążeniem jest wyznaczany (w opracowanym systemie wspomaganego projektowania) w programie Abaqus na wycinku współpracującej pary stożkowej. Obciążenie w postaci momentu skręcającego jest przyłożone do koła. Po zdefiniowaniu powierzchni kontaktowych oraz warunków utwierdzenia i dopuszczalnych obrotów, możliwe jest uzyskanie śladu współpracy pod zadaniem obciążeniem (rys. 3.3) oraz rozkładu naprężeń w modelu koła i zębniaka.



Rys. 3.3 Sumaryczny ślad współpracy pod obciążeniem [4]

Klasyczna weryfikacja otrzymanego wirtualnie śladu współpracy (na kontrolerze metodą tuszowania) daje jedynie odpowiedź na pytanie o poprawność śladu współpracy bez

obciążenia. Znacznie poszerzoną weryfikację symulacji współpracy można wykonać na stanowisku badawczym, które pozwala na ocenę funkcjonowania zaprojektowanej przekładni w zadanych warunkach pracy.

Nowe możliwości w zakresie badań współpracy pod obciążeniem stwarza unikalna maszyna do badań zmęczeniowych TS30, uruchomiona w Laboratorium Badań Kół Zębatych Politechniki Rzeszowskiej. Pozwala ona na długotrwałe badania pary stożkowej w precyzyjnie zadanych warunkach obciążeń stałych lub zmiennych (programowanie przebiegu momentu skręcającego oraz obrotów). Możliwa jest zatem nie tylko weryfikacja śladu współpracy pod obciążeniem uzyskanego w MES ale także obserwacja jakości pracy nowo zaprojektowanej przekładni w trakcie zużywania się uzębień. Dodatkowo można wprowadzać kontrolowane błędy wzajemnego położenia zębniaka i koła oraz sprawdzać wrażliwość dopasowanych powierzchni bocznych zębów na odchyłki montażowe lub błędy wykonania korpusów. Rozbudowany system czujników pozwala także na pomiar naprężeń u podstawy zęba, pomiar hałasu, oraz rejestrację rozkładu temperatury na powierzchniach zębów kamerą termowizyjną.



Rys. 3.4 Koło i zębniak z widocznym śladem współpracy, uzyskany dzięki badaniom pod obciążeniem na stanowisku TS30

Praktyczne sprawdzenie przekładni w trakcie jej pracy wyklucza czynniki mające wpływ na wyniki otrzymane przez symulacje bryłowe (przyjęta grubość warstwy tuszu, rodzaj elementów skończonych, gęstość siatki itd.), przy czym weryfikuje jakość opracowanych symulacji oraz ich przydatność do formułowania prawidłowych wniosków odnośnie jakości współpracy zazębienia.

#### 4. WNIOSKI

Doświadczalna weryfikacja wirtualnych modeli symulacyjnych i przyjętych algorytmów programowych jednoznacznie określa ich przydatność do samodzielnego stosowania w projektowaniu przekładni stożkowych. Potwierdzenie poprawności wyników uzyskanych w środowiskach CAD i MES pozwala na bezpieczne przeniesienie części eksperymentalnej do inżynierskich systemów symulacyjnych, co przekłada się na skrócenie czasu opracowania i wdrożenia nowej konstrukcji, a także na wydatne zmniejszenie kosztów przygotowania produkcji.

*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] Kret M., Skawiński P.: *Mathematical model of the modified roll for spiral bevel gears milling machines*. Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 37, No. 2, 2013
- [2] Marciniak A., Pisula J., Płocica M., Sobolewski B.: *Projektowanie przekładni stożkowych z zastosowaniem modelowania matematycznego i symulacji w środowisku CAD*. Mechanik, nr 7/2011, str. 602-605
- [3] Marciniak A., Sobolewski B.: *Zastosowanie systemu Autodesk Inventor do symulacji współpracy przekładni stożkowych Gleason'a*. Mechanik, nr 2/2014.
- [4] Pacana J., Fudali P.: *Opracowanie aplikacji do analizy współpracy przekładni stożkowej pod obciążeniem roboczym w środowisku MES-Abaqus*. Raport z prac prowadzonych w I i II kwartale 2014 roku. Politechnika Rzeszowska.
- [5] Pisula J., Płocica M.: *Analiza współpracy pary stożkowej na podstawie matematycznego modelu obróbki oraz bezpośredniej symulacji nacinania w programie Inventor*. Mechanik nr 1/2012, str. 78-79.
- [6] Pisula J., Płocica M.: *Guidelines for the quality development of aircraft bevel gears*. AIRTEC, International Aerospace Supply Fair, Frankfurt am Main, 5-7 November 2013.
- [7] Pisula J., Płocica M.: *Methodology of designing the geometry of the bevel gear using numerical simulation to generate the teeth flank surfaces*. Acta Mechanica et Automatica, Vol. 8 No. 1 (2014), str. 5-8.
- [8] Pisula J., Płocica M.: *Ocena jakości współpracy projektowanej pary stożkowej z użyciem autorskiego systemu wspomaganie projektowania*. Mechanik nr 2/2013. Artykuł na płycie CD.
- [9] Płocica M.: *Aplikacja wspomagająca projektowanie lotniczych przekładni stożkowych z użyciem CAD*. XII Forum Inżynierskie Stowarzyszenia ProCAX, cz. I w Sosnowcu, 1-3 października 2013 r.
- [10] Rakowiecki T., Skawiński P., Siemiński P.: *Wykorzystywanie parametrycznych szablonów systemu 3D CAD do generowania modeli uzębień kół stożkowych*. Mechanik nr 12/2011, str. 927-928.
- [11] Skawiński P.: *Technological setups of the Gleason CNC spiral bevel and hypoid gear milling machines*. Advances in Manufacturing Science and Technology, Vo.36, No.4, 2012, str. 33-43.
- [12] Skawiński P., Siemiński P., Pomianowski R.: *Generowanie modeli bryłowych uzębień stożkowych za pomocą symulacji oprogramowanych w systemie 3D CAD*. Mechanik nr 11/2011, str. 922-924.