MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-M/2010
ZESZYT 7
ROK 107
ISSUE 7
YEAR 107

ADAM MARCINIEC, GRZEGORZ BUDZIK, BARTŁOMIEJ SOBOLEWSKI*,
MIROSŁAW GRZELKA, MICHAŁ WIECZOROWSKI**

OCENA DOKŁADNOŚCI PROTOTYPÓW STOŻKOWYCH KÓŁ ZĘBATYCH Z ZASTOSOWANIEM CMM

THE ASSESSMENT OF SPIRAL BEVEL GEAR PARTS ACCURACY WITH THE OPTICAL CMM

Streszczenie

Niniejszy artykuł przedstawia możliwości oceny stożkowych kół zębatych z zastosowaniem optycznej współrzędnościowej metody pomiarowej. Badaniu poddano modele przekładni stożkowej wykonane przyrostowymi metodami szybkiego prototypowani – *Fused Deposition Modeling* (FDM) i *Stereolithograpy* (SLA). Do badań zastosowano optyczną współrzędnościową metodę pomiarową w oparciu o skaner i oprogramowanie firmy GOM.

Słowa kluczowe: koła zębate, współrzędnościowa metoda pomiarowa, rapid prototyping

Abstract

This paper presents the capabilities of the assessment of spiral bevel gears accuracy with the optical scanning method. Under the examination were put the models of spiral bevel gear drive parts build with the incremental Rapid Prototyping methods: Fused Deposition Modeling (FDM) and Stereolithograpy (SLA). The measurements were made with the optical coordinate measuring machine and the appropriate software supplied by the GOM Company.

Keywords: gear, coordinate measuring method, optical CMM, rapid prototyping

* Dr hab. inż. Adam Marciniec, dr hab. inż. Grzegorz Budzik, mgr inż. Bartłomiej Sobolewski, Katedra Konstrukcji Maszyn, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

** Dr inż. Mirosław Grzelka, dr hab. inż. Michał Wieczorowski, Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Poznańska.

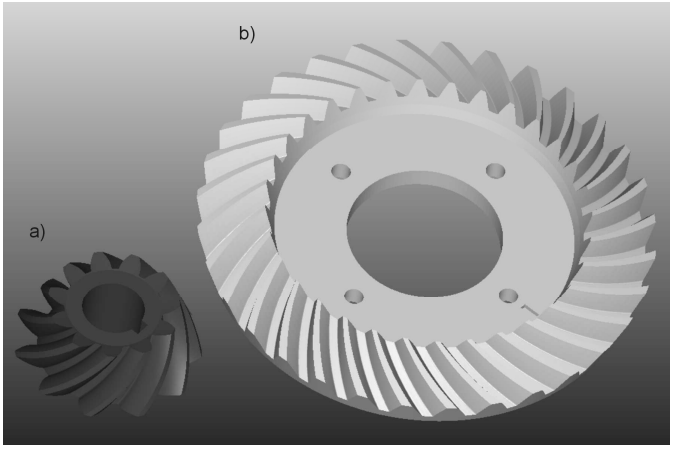
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Analiza dokładności geometrycznej kół zębatych przekładni stożkowej o zębach kołowo-łukowych jest skomplikowanym zagadnieniem. Z tego względu w procesie pomiarowym niezwykle przydatne są współrzędnościowe metody pomiarowe. Do pomiarów kół zębatych przekładni stożkowej o zębach kołowo-łukowych stosuje się najczęściej współrzędnościowe dotykowe metody pomiarowe, w tym przypadku proces pomiaru wymaga zastosowania stołów obrotowych lub specjalistycznego oprogramowania [2, 5, 12–18, 21, 22]. Współrzędnościowe optyczne systemy pomiarowe pozwalają na określenie dokładności wykonania elementów o złożonych kształtach [1, 3]. Rozwój tych systemów pomiarowych, szczególnie ich dokładności, pozwala brać pod uwagę ich zastosowanie do analizy dokładności kół stożkowych. Ich zaletą jest znaczne skrócenie czasu pomiaru. Pozostaje pytanie, czy dokładność tych pomiarów jest wystarczająca do wymagań współczesnego przemysłu? Z tego względu przeprowadzono badania dokładności prototypów kół zębatych przekładni stożkowej wykonane przyrostowymi metodami RP (SLA i FDM).

2. Modelowanie i prototypowanie badawczych kół zębatych

Programy do modelowania 3D-CAD umożliwiają wykonanie koła zębatego o teoretycznie dowolnym kształcie [4, 19, 20]. Ograniczeniem może być jedynie znalezienie sposobu modelowania złożonych geometrycznie kształtów. W przypadku modelownia kół zębatych stosuje się kilka metod określania geometrii zazębienia, m.in. przez modelownie geometryczne i modelowanie z zastosowaniem symulacji obróbki. Do badań wykorzystano modele geometryczne CAD kół stożkowych o kołowo-łukowej linii zęba typu Gleason SGM wykonane metodą symulacji obróbki w programie Autodesk Inventor (rys. 1).



Rys. 1. Modele kół zębatych przekładni Gleasona: a) zębnika, b) koła talerzowego

Fig. 1. Solid models of gears of a spiral bevel gear drive of Gleason type a) a pinion, b) a gear wheel

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Model CAD został wyeksportowany do formatu STL. Przyjęto dokładność powierzchniową modelu STL w stosunku do modelu CAD równą 0,005 mm. Modele CAD oraz ich eksport zostały wykonano w programie Mechanical Desktop. Zastosowanie tego programu pozwoliło na uzyskanie bardzo dokładnych modeli bez błędów, które mogą powstać w trakcie procesu eksportu danych do formatu STL. Do wykonania modeli fizycznych zastosowano przyrostowe metody szybkiego prototypowania *Fused Deposition Modelling* (FDM) i Stereolitografię (SLA – rys. 2).

Rys. 2. Modele SLA kół zębatych

Fig. 2. STL models of gears

3. Pomiary kół zębatych z wykorzystaniem optycznego skanera współrzędnościowego

Współrzędnościowa technika pomiarowa umożliwia pomiary kół zębatych na maszynach pomiarowych z zastosowaniem stykowych i bezstykowych głowic pomiarowych oraz z zastosowaniem optycznych metod pomiarowych. Przetwarzanie wyników pomiarów we wszystkich przypadkach odbywa się z wykorzystaniem zaawansowanych specjalizowanych programów do obróbki danych pomiarowych.

Badania przeprowadzono na prototypach wykonanych w technologiach FDM i SLA w celu określenia możliwości i dokładności pomiaru kół zębatych stożkowych o zębach kołowo łukowych z zastosowaniem pomiarowych optycznych metod współrzędnościowych. Dodatkowo określono rzeczywistą dokładność wykonania prototypów wykonanych metodami SLA i FDM.

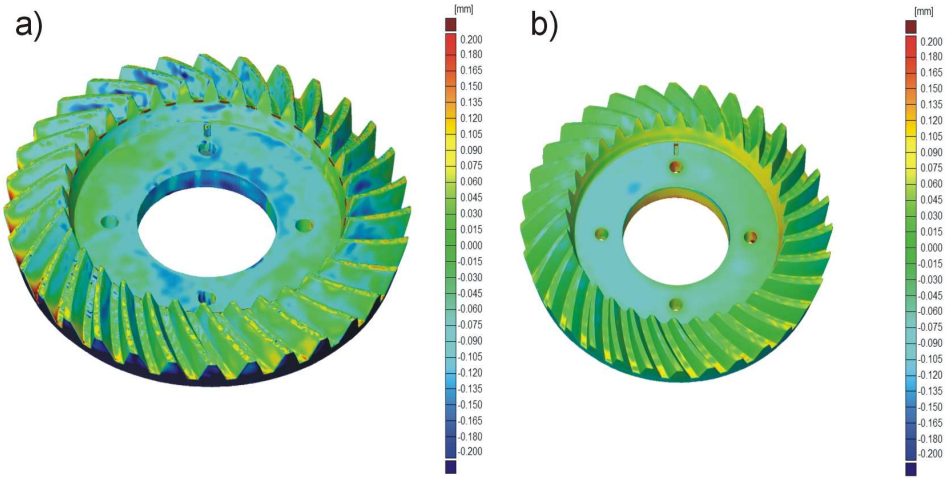
We współrzędnościowych optycznych metodach pomiarowych dokładność identyfikacji punktów pomiarowych uzależniona jest od zastosowanego układu optycznego, czyli pola pomiarowego. Szczegółowy opis przedstawiony został w artykułach [6 – 11].

Zastosowanie optycznych skanerów oraz opracowanej dla potrzeb pomiaru kół zębatych metodyki i algorytmów pozwala na metrologicznie poprawny pomiar charakterystycznych cech geometrycznych, determinujących dokładność wykonania mierzonych elementów. Na potrzeby badań zastosowano pole pomiarowe „175” optycznego skanera współrzędnościo-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

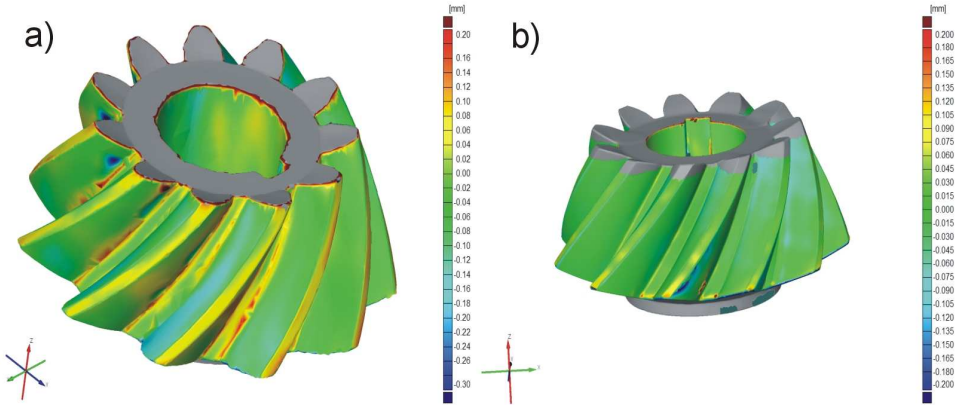
wego GOM ATOS II w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

Pomiarom poddano koło i zębnik wykonane w technologii FDM i SLA. Analizę dokładności przeprowadzono z wykorzystaniem tych samych modeli CAD/STL, na podstawie, których wykonano przykładowe koła przekładni zębatej stożkowej o kołowo-łukowej linii zęba typu Gleason. Wyniki poszczególnych analiz przedstawiają rysunki od 3 do 6. Odpowiednio przeprowadzono analizy odchyłek wykonawczych dla koła i zębnika. Analiza wykonana została kompleksowo (rys. 3, 4) zgodnie z bazowaniem układu współrzędnych na rzeczywistej osi obrotu koła/zębnika.



Rys. 3. Odchyłki prototypów koła: a) FDM, b) SLA

Fig. 3. Deviations of the gear wheel prototypes: a) FDM, b) SLA

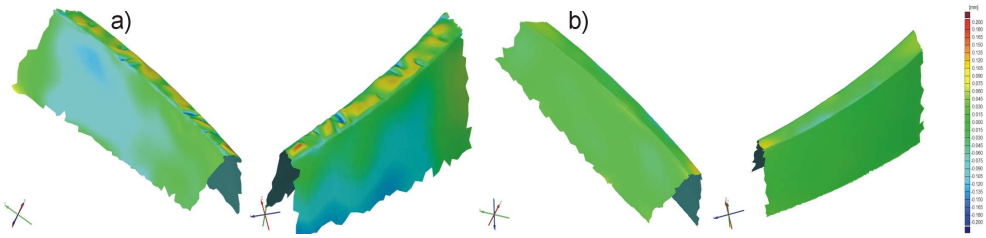


Rys. 4. Odchyłki prototypów zębnika: a) FDM, b) SLA

Fig. 4. Deviations of the pinion prototypes: a) FDM, b) SLA

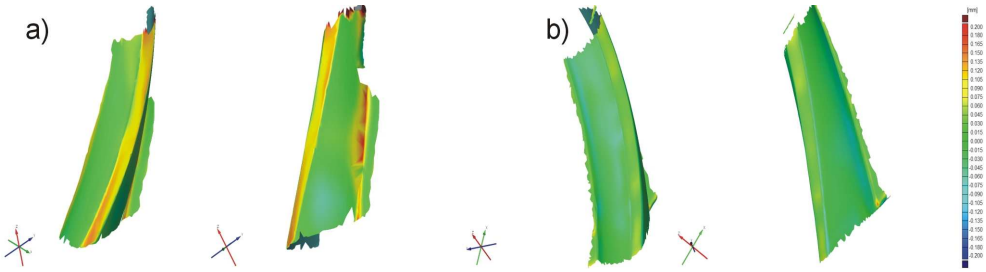
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dodatkowo przeprowadzono analizę odchyłek wybranego zęba, dla której określono dopasowanie wyników pomiaru (siatka trójkątów po procesie poligonizacji chmury punktów) do modelu CAD jako „best-fit” (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Odchyłki boków zęba koła: a) FDM, b) SLA

Fig. 5. Dimension deviations of a gear wheel tooth flanks a) FDM, b) FDM



Rys. 6. Odchyłki boków zębów zębnika: a) FDM, b) SLA

Fig. 6. Dimension deviations of the pinion tooth flanks a) FDM, b) FDM

Na podstawie analizy wartości odchyłek koła i zębnika we wszystkich zmierzonych punktach pomiarowych w porównaniu z modelem CAD ocenić można jednoznacznie, że koła wykonane w technologii SLA z materiału SL5170 cechują małe wartości odchyłek granicznych. Przedział odchyłek we wszystkich punktach to < 0, - 0,06 > mm. Dla koła wykonanego w technologii FDM z materiału ABS to < 0, - 0,16 > mm. Występujące lokalnie odchyłki o wartościach dodatnich spowodowane są nieciągłościami, brakiem punktów pomiarowych, a w miejscach występowania bardzo małych promieni powierzchni przejściowych zbyt małą liczbą punktów pomiarowych.

Analiza wartości rzeczywistych odchyłek kół zębatych wykonanych w różnych technologiach Rapid Prototyping i z różnych materiałów, a przede wszystkim ich charakterystycznego rozmieszczenia, może być podstawą do stworzenia map korekcji modelu CAD koła zębatego dla uzyskania elementu zgodnego z założonym modelem w bardzo wąskich tolerancjach.

4. Wnioski

Współrzędnościowe optyczne metody pomiarowe mogą być z powodzeniem stosowane do analizy dokładności wykonania stożkowych kół zębatych o kołowo-łukowej linii zęba.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Dokładność metody pomiarowej wykorzystującej system GOM pozwala na określanie dokładności wykonania kół zębatych wykonanych z zastosowaniem różnych technologii wytwarzania, w tym RP. Proces pomiarowy w tym przypadku jest szybki, a obróbka danych pomiarowych pozwala na otrzymanie kompleksowej mapy odchyłek mierzonego obiektu.

Pomiary kół zębatych wykonanych dwiema przyrostowymi metodami RP (SLA i FDM) pozwoliły na określenie rzeczywistej dokładności wykonania prototypu przekładni stożkowej. Modele kół zostały zorientowane na platformie roboczej, tak że oś obrotu była równoległa do osi z urządzenia RP. Takie usytuowanie zapewnia uzyskanie maksymalnej możliwej dokładności wytwarzanych kół zębatych. Wytwarzanie prototypów kół zębatych z zastosowaniem metod RP jest oparte na modelu 3D-CAD. Z tego względu było możliwe określenie wartości odchyłek w odniesieniu do modelu nominalnego 3D-CAD. W przypadku pomiarów z zastosowaniem współrzędnościowych metod optycznych kształt kół oraz zarys zębów nie ma szczególnego znaczenia podczas procesu pomiarowego. Za pomocą pomiaru i analizy parametrów geometrycznych kół zębatych można dokonać kompensacji błędów przez wtórne zastosowanie rozkładu odchyłek w celu korekcji kształtu modeli CAD dla powtórnej generacji modeli fizycznych z zastosowaniem urządzeń RP.

Analiza odchyłek kół zębatych oraz ich rozbicie na odchyłki elementarne umożliwia wyizolowanie poszczególnych parametrów technologicznych urządzeń RP, które w dominujący sposób mogą wpływać na powstające odchyłki.

Poprawę dokładności modeli RP, można uzyskać na różnych etapach procesu technologicznego. W pierwszej kolejności, na etapie wykonania modelu, obróbki danych numerycznych i eksportu danych do formatu RP np. STL czy SLC. Jest to szczególnie istotne dla kół, których zarys zębów generowanych jest w procesie symulacji obróbki. Na tym etapie modelowania mogą pojawić się błędy modelu numerycznego. Błędy takie nie są możliwe do ustalenia na modelu STL. Ujawniają się na ostatnim etapie procesu wytwarzania – podczas budowy warstw zarysu zazębienia. Jest to szczególnie widoczne w metodzie stereolitografii, której oprogramowanie (3D Lightyear) jest wrażliwe na tego typu błędy programowe. Badane koła zębate wykazują się wyższą dokładnością niż zakładana dla tej metody (±0,1 mm), którą uzyskano w wyniku odpowiedniej kalibracji urządzenia stereolitograficzmego typ SLA-250.

Koła zębate wykonane metodą FDM mają dobrą dokładność, jednak niższą niż SLA. Powodem tego jest nominalna dokładność urządzania determinowana szczególnie w osi z grubością nakładanej warstwy (0,256 mm) dla urządzenia U-Print. Jednak średnia wartość odchyłek jest mniejsza niż zakładane przez producenta wartości dla urządzenia U-Print.

Badania realizowane w ramach Projektu Nr POIG.0101.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). *Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.*

Literatura

[1] Budzik G., *Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[2] Budzik G., Dziubek T., Sobolewski B., Zaborniak M., *Application of the coordinate measuring technique for the determination of accuracy of gear wheels produced by selected incremental rapid prototyping methods*, IX International Scientific Conference, „Coordinate Measuring Technique", 14–16.04.2010.

[3] Budzik G., Marciniec A., Markowski T., Oleksy M., Cygnar M., *The geometrical precision of the silicone matrices to the manufacturing of the models of the gear*, Archives of Foundry Engineering. Vol. 9, No. 2, 2009.

[4] Budzik G., Markowski T., *Kryteria doboru metody szybkiego wytwarzania prototypów kół zębatych*, Materiały Konferencyjne XXIV Sympozjonu Podstaw Konstrukcji Maszyn, Białystok–Białowieża 2009, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.

[5] Goch G., *Gear Metrology*, Annals of CIRP 52/II, 2003.

[6] Grzelka M., *The Newest Algorithm, Analysis of The Accuracy and Recommendations on the Measurement of Cylindrical Gears with Coordinate Measuring Machines*, Advantages: *Development of Mechanical Engineering as a Tool for the Enterprise Logistics Progress*, ed. Stanislaw Legutko, Poznań 2006, s. 257-278.

[7] Grzelka M., *Selection of the Coordinate Measuring Machine for the Gear Measurement*, VI-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Ustroń, 21–23 kwietnia 2004 r., Zeszyty Naukowe nr 10, s. 55-62.

[8] Grzelka M., *Possible applications of the optical coordinate skaner GOM ATOS II*, Coordinate Measuring Technique. Problems and implementations, University of Bielsko-Biala 2008.

[9] Grzelka M., *Analysis of the accuracy of the optical coordinate measuring systems GOM ATOS II*, Coordinate Measuring Technique. Problems and implementations. University of Bielsko-Biala 2008.

[10] Grzelka M., Szelewski M., *Selection of the Coordinate Measuring Machine for the Gear Measurement*, 8th IMEKO International Symposium on Measurement and Quality Control in Production, Erlangen, Germany October 12–15, 2004.

[11] Grzelka M., Gapiński B., *Recommendations on the Measurement of Cylindrical Gears with Coordinate Measuring Machines*, Book of Summaries, XVIII IMEKO World Congress, September, 17–22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil, s. 138.

[12] Haertig F., Lotze W., *3D Gear Measurement by CMM*, Laser Metrology and Machine Performance V, 2001.

[13] Jakubiec W., Malinowski J., *Metrologia wielkości geometrycznych*, WNT, Warszawa 1993.

[14] Jaskólski J., Budzik G., Grzelka M., Oleksy M., *Three dimensional scanning of geometiy of blade aircraft engine with non-contact measuring methods.* Combustion Engines, No. 2009-SC1.

[15] Marciniec A., Dziubek T., Zaborniak M., *Podwyższanie dokładności skaningowych pomiarów kół zębatych wykonanych metodą SLA*, Konferencja naukowo-techniczna „Koła Zębate" 2008, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[16] Marciniec A., Dziubek T., Zaborniak M., *Zastosowanie współrzędnościowej techniki pomiarowej i systemów CAD do pomiaru wybranych odchyłek walcowych kół zębatych o zębach śrubowych wykonywanych technikami szybkiego prototypowania*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
[17] Neumann H.J., *Industrial Coordinate metrology*, Verlag Moderne Industrie, Lansberg, Lech 2000.
[18] Ratajczyk E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
[19] Sobolak M., Budzik G., *Experimental Method Of Tooth Contact Analysis (TCA) With Rapid Prototyping (RP) Use*, Rapid Prototyping Journal. Vol. 14, No. 4, 2008.
[20] Stankiewicz M., Budzik G., Patrzałek M., Wieczorowski M., Grzelka M., Matysiak H., Slota J., *The Scope of Application of Incremental Rapid Prototyping Methods in Foundry Engineering*, Archives of Foundry Engineering, Issue 1/2010.
[21] PN-ISO 1328-1 Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Odchyłki jednoimiennych boków zębów.
[22] PN-ISO 1328-2 Przekładnie zębate walcowe. Dokładność wykonania według ISO. Odchyłki złożone promieniowe oraz odchyłki bicia.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ