

# **ZASTOSOWANIE WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWEJ TECHNIKI POMIAROWEJ I SYSTEMÓW CAD DO POMIARU WYBRANYCH ODCHYLEK WALCOWYCH KÓŁ ZĘBATYCH O ZĘBACH ŚRUBOWYCH WYKONYWANYCH TECHNIKAMI SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA**

**Adam MARCINIEC<sup>1</sup>  
Tomasz DZIUBEK<sup>2</sup>  
Małgorzata ZABORNIAK<sup>3</sup>**

## **STRESZCZENIE**

*Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania standardowego oprogramowania WMP na potrzeby pomiarów kół zębatach. Wykorzystanie oprogramowania CATIA V5 dało możliwość szybszego i dokładniejszego przetwarzania danych otrzymanych z pomiarów, w celu ustalenie odchyłek zarysu zęba oraz powierzchni bocznej.*

## **1. WSTĘP**

Systemy CAD dają możliwość modelowania różnorodnych kół zębatach, oraz ich modyfikacji, nawet takich, które są niemożliwe do uzyskania tradycyjnymi metodami obróbki skrawaniem. Zastosowanie szybkiego prototypowania pozwala na wykonywanie kół zębatach z tworzyw sztucznych mających szerokie zastosowanie od przemysłu samochodowego po drobny

---

<sup>1</sup> dr hab. inż. Adam Marciniak, prof. PRz – Politechnika Rzeszowska

<sup>2</sup> mgr inż. Tomasz Dziubek – Politechnika Rzeszowska

<sup>3</sup> mgr inż. Małgorzata Zaborniak – Politechnika Rzeszowska

sprzęt AGD. Jedną z technik szybkiego prototypowania, jest jedna z najlepiej rozwijających się i najdokładniejszych metod – stereolitografia (SLA). Na jednym urządzeniu można jednocześnie wykonywać kilka różnych kół zębatach i każde z nich może posiadać inną geometrię. Korzyści z takiej metody wytwarzania są szczególnie zauważalne przy wytwarzaniu prototypów do badań i produkcji jednostkowej.

Potrzeba pomiarów kół zębatach zintegrowanych z procesem wytwarzania w dzisiejszych czasach jest spowodowana nieustającym rozwojem maszyn technologicznych, zawężaniem pola tolerancji kół zębatach, oraz koniecznością wyznaczania niepewności pomiarowej i wzrostem liczby parametrów, których wpływ należy brać pod uwagę przy ocenie wytworzonych kół zębatach. Wymagania związane z dokładnością, różnorodnością mierzonych wielkości i dopuszczalnym czasem pomiaru, są ściśle powiązane metodami produkcji. Ponieważ pomiar nie jest celem samym w sobie, lecz środkiem do uzyskania określonych celów ekonomicznych. Cele te są nieustannie definiowane na nowo ze względu na stałe dążenie do polepszania efektywności kosztów i poprawy funkcjonalności kół zębatach. Stosownie do zmian w technologii produkcji, zmieniają się wymagania dotyczące pomiarów kół zębatach. Wymagania, aby wyniki pomiarów były łatwe do interpretacji, pomiary były zautomatyzowane i zintegrowane z procesem technologicznym, doprowadziły do rozwoju automatycznych maszyn pomiarowych.

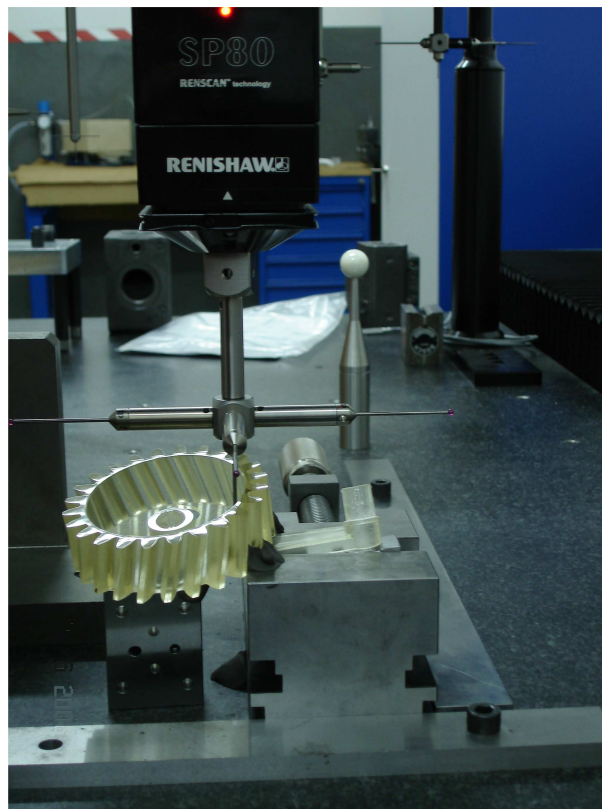
Dostępne są komercyjne programy przeznaczone do pomiaru kół zębatach, niestety ze względu na cenę są one często nieosiągalne dla wszystkich producentów kół zębatach. Ponadto dotychczasowa metodologia pomiarów bazowała głównie na pomiarach ewolwenty. Nowoczesne techniki komputerowe zintegrowane z systemami CAD dają możliwość rozszerzenia zakresu pomiarów bez użycia specjalistycznego oprogramowania WMP do pomiaru kół zębatach. Artykuł przedstawia możliwości wykorzystania standardowego oprogramowania WMP na potrzeby pomiarów kół zębatach.

## **2. STRATEGIA POMIARÓW KÓŁ ZĘBATYCH**

Wykonujący pomiary jest odpowiedzialny za ustawienie i zamocowanie koła zębatego na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (WMP), wybór i zestawienie końcówek pomiarowych i użycie dodatkowego sprzętu (np. stołu obrotowego, mechanizmu wymiany głowic pomiarowych (o ile maszyna jest wyposażona w takie oprzyrządowanie). W pierwszym etapie pomiaru mierzone koło jest bazowane w przestrzeni pomiarowej WMP (rys.1.).

Zaletą pomiarów na maszynach współrzędnościowych jest możliwość prawie dowolnego bazowania detalu, z tego względu, że dopasowywanie koła zębatego do układu współrzędnych odbywa się na podstawie stosownych zależności matematycznych. Chociaż maszyna dysponuje własnym układem

współrzędnych, można zdefiniować nowy układ obowiązujący dla mierzonego koła zębatego. Do tej czynności należy podejść jednak z wielką uwagą, ponieważ błędy popełniane przy ustalaniu układu współrzędnych są powielane i obarczają sobą wszystkie następne pomiary (podobnie rzecz ma się z procesem kalibracji). Istotną sprawą jest odpowiedni wybór elementów geometrycznych w mierzonej kole, na podstawie, których ustalany jest układ współrzędnych. W tym celu wybiera się podstawowe elementy geometryczne (tj. okrąg, prosta, płaszczyzna) wykonane w jak najwyższej klasie dokładności.



Rys. 1. Bazowanie koła w przestrzeni roboczej WMP

Następnie przechodzi się do czynności związanych z wyborem strategii pomiaru, tzn. liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych, zastosowanie filtracji punktów i metody opracowania wyników. Problemy, jakie się pojawiają to, utrudniony dostęp do mierzonej powierzchni. Na dokładność pomiaru ma wpływ nie tylko krzywizna skanowanej powierzchni, ale również struktura i jakość powierzchni kół zębatych wykonanych z tworzywa sztucznego. Warstwowa budowa modeli jest podstawowym źródłem odchyłek

geometrycznych i chropowatości powierzchni. Dokładność wymiarowa zależy od zastosowanego urządzenia RP. Ustawienie modeli w przestrzeni roboczej w bardzo istotny sposób wpływa na strukturę takich powierzchni. W przypadku wytwarzania kół zębatych wpływ warstwowej budowy modelu można ograniczyć poprzez pionowe umieszczanie elementu w przestrzeni roboczej urządzenia, co niestety i tak nie ma wpływu na pomiar na WMP. Zmniejszenie prędkości skanowania umożliwia bardziej precyzyjne przetwarzanie danych pozyskiwanych w procesie digitalizacji.

Różnice wyników pomiaru spowodowane przez różne strategie mogą być nawet większe, niż odchyłki kształtu i położenia mierzonego przedmiotu. Okazać się też może, że decydującym czynnikiem mogącym spowodować największe błędy i niepewności pomiaru będzie ten, dla którego istnieje najmniej środków zaradczych w celu uzyskania porównywalnych wyników pomiaru [4].

Przez matematyczne wyznaczenie parametrów figur oraz brył geometrycznych można opisać położenie mierzonego detalu w przestrzeni maszyny pomiarowej. Dla podstawowych elementów geometrycznych (tj. punkt, prosta, płaszczyzna itp.) znane są minimalne liczby punktów umożliwiające wyznaczenie parametrów pomiarowych. Jednak, gdy należy wyznaczyć, na określonym poziomie ufności, odchyłki wymiarów, kształtu, kierunki i wielkości bicia rzeczywistych przedmiotów, kwestia koniecznej liczby punktów pomiarowych jest w wielu przypadkach problemem trudnym do rozwiązania. Praktyka przemysłowa pokazuje stosowanie minimalnej pomiarowej liczby punktów, które w wielu przypadkach nie jest wystarczające. WMP z możliwością pomiaru w trybie skaningowym zapewnia uzyskanie takiej gęstości punktów pomiarowych, która na ogół jest zupełnie wystarczająca. Brak jednak ciągle odpowiedzi na pytanie, jak blisko względem siebie powinny być np. rozmieszczone zarysy, w których wykonuje się skanowanie oraz w jaki sposób przeprowadzać filtrację otrzymanych wyników pomiarowych.

Po zamocowaniu koła na stole WMP i wyborze strategii przechodzi się do pomiaru.

### **3. POMIARY I ANALIZA WYBRANYCH ODCHYLEK KOŁA ZĘBATEGO WALCOWEGO O ZĘBACH ŚRUBOWYCH**

Klasyczne metody pomiarów polegają na porównaniu rzeczywistej geometrii uzębienia do geometrii nominalnej. Proces pomiaru kół zębatych jest pracochłonny głównie z powodu dużej ilości parametrów charakteryzujących koła. Tradycyjnie wyposażone służby kontroli mają jednak zwykle ograniczone możliwości techniczne. Obejmują one pomiary otoczki koła i bicia promieniowego i osiowego uzębienia. Ocena luzu międzyzębnego i śladu przylegania zębów jest możliwa dopiero w zamontowanej przekładni.

Specjalistyczne oprogramowanie WMP do kół zębatach umożliwia w pełni automatyczne pomiary odchyłki zarysu (ewolwenty), linii zęba, podziałek i bicia promieniowego, topografii boku zęba. Obliczenia przeprowadza się wg norm DIN, AGMA lub w odniesieniu do swobodnie określonych tolerancji. Niestety nie każdy producent może pozwolić sobie na dostęp do takiego pakietu oprogramowania. Ponadto konsekwentna politykę utajniania wszelkich informacji przez producentów komercyjnych oprogramowań do pomiaru kół zębatach powoduje dodatkowe utrudnienia. Wykorzystanie nowoczesnego oprogramowania CATIA V5 staje się jednym ze sposobów szybszego i dokładniejszego przetwarzania danych otrzymanych z pomiarów, a następnie porównanie ich z modelem CAD w celu ustalenie odchyłek.

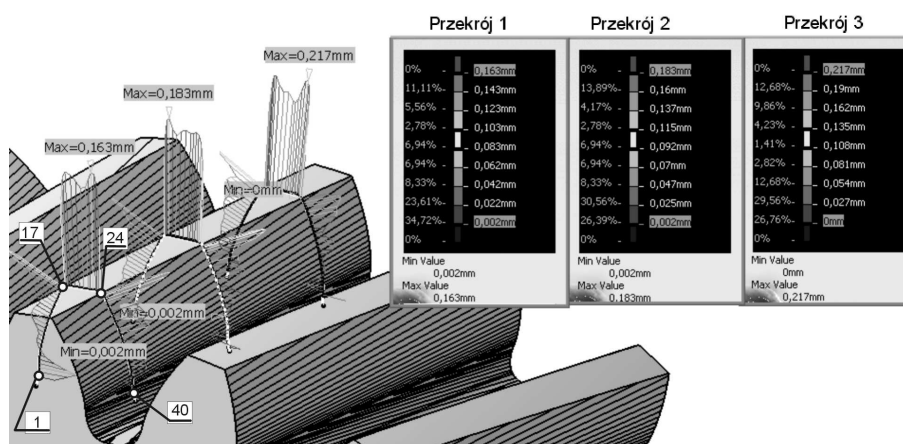
Pomiary przeprowadzono na maszynie Wenzel LH87 wyposażoną w standardowe oprogramowanie Metrosoft CM3.7, zgodnie z następującymi parametrami: krok skanowania 0,5 mm, prędkość skanowania 5 mm/s, średnica kulki pomiarowej 0,7 mm. Pomiarom poddane zostało koło zębate walcowe o zębach śrubowych wykonane w procesie polimeryzacji ciekłej żywicy fotoutwardzanej wiązką lasera (metoda SLA), o następujących parametrach: moduł normalny  $m_n = 5$  mm, kąt zarysu  $\alpha_0 = 20^\circ$ , liczba zębów  $z = 24$ , kąt pochylenia linii zęba  $\beta = 15^\circ$ .

Wybrano pomiary zarysu zęba w trzech przekrojach oraz pomiar powierzchni bocznej, natomiast nie uwzględniono np. odchyłek błędów podziałki. Ponieważ koła zębata wykonane technikami szybkiego prototypowania charakteryzują się „schodkową” budową powierzchni wynikającą z warstwowej budowy modelu to pomiary takich kół charakteryzują się inną specyfiką. Znając rozkład odchyłek np. powierzchni bocznej i zarysu można wprowadzać korekty w tworzeniu modeli SLA. Pomiar pozostałych odchyłek planowany jest w kolejnych etapach pracy badawczej.

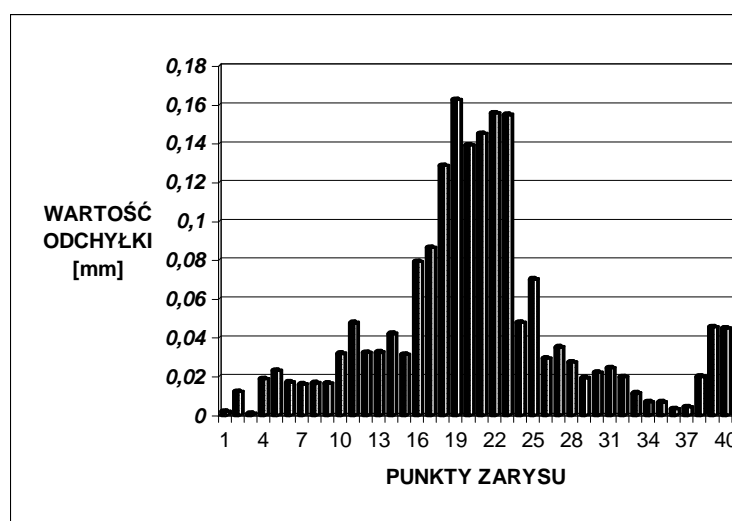
### 3.1. POMIARY I ANALIZA ODCHYLEK ZARYSU

Pomiary odchyłek zarysu zęba koła przeprowadzono w trzech przekrojach. Odchyłki zarysu są definiowane w przekroju czołowym (rys. 2.).

Na podstawie pomiaru sporządzono wykres odchyłek zarysu zęba (w przekroju 1) w wybranych punktach (rys. 3.). W pozostałych zarysach rozkład odchyłek jest zbliżony. Odchyłki w przekroju 1 przyjmują wartości dodatnie, przy minimum wynoszącym 0,002 mm i maksimum 0,163 mm.



Rys. 2. Odchyłki zarysu zdefiniowane w przekroju czołowym



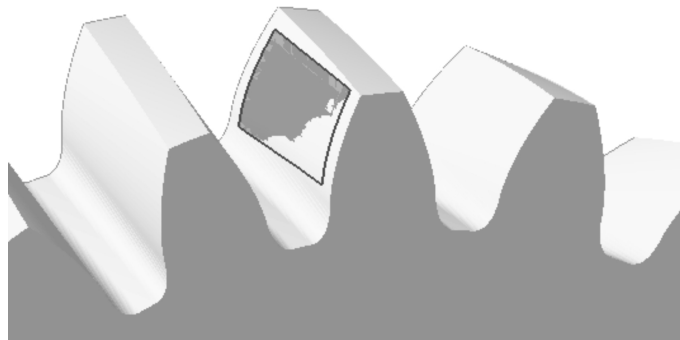
Rys. 3. Wykres wybranych odchyłek zarysu

Z przedstawionej analizy wynika, że największe wartości odchyłek występują (pomiędzy punktem 17 a 24 zarysu) przy wierzchołku zęba. Co prawda punkty zarysu 17 ÷ 24 osiągają największe wartości odchyłek, ale nie wpływają one istotnie na współpracę kół przekładni. W pozostałych punktach zarysu wielkości odchyłek są nie regularne, na co prawdopodobnie miała wpływ struktura powierzchni koła jak również sama analiza krzywych mierzonych. Można podejrzewać, że podczas analizy punkty zarysu znalazły się krzywej przejścia u podstawy zęba. Na tak nie równomierny rozkład odchyłek

mógł mieć też wpływ proces skurczu materiału podczas procesu polimeryzacji. Dokładniejsze wyjaśnienie wymaga podjęcia dalszych wnikliwych analiz.

### 3.2. POMIAR POWIERZCHNI BOCZNEJ

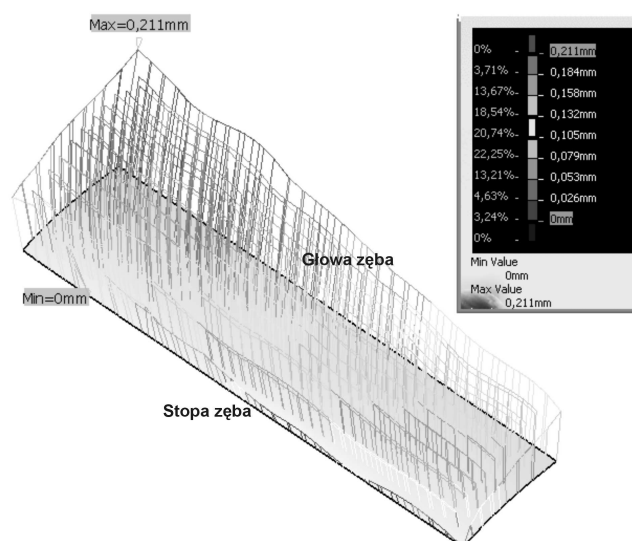
Jednym z zasadniczych elementów przy produkcji kół jest zdefiniowanie w postaci matematycznej formy boków zębów, a następnie dążenie do realizacji tak narzuconego kształtu boku zęba na rzeczywistym kole zębatym. Topografie boków zębów otrzymuje się w postaci wykresu powierzchni w układzie  $x, y, z$ . Określane są współrzędne punktów powierzchni zębów jako siatki przestrzenne (rys. 4.).



Rys. 4. Siatka pomiarowa na powierzchni bocznej

Na każdym boku otrzymuje się siatkę o wymiarach  $m \times n$ . Norma [1] określa w sposób jednoznaczny położenie, rozmiar oraz narożniki siatki pomiarowej na powierzchni bocznej.

Pomiar powierzchni rzeczywistej następuje w porównaniu z teoretyczną powierzchnią zębów koła. Wyniki tych pomiarów traktuje się jako informacje o uzyskiwanym rozrzucie. Pomiar odchylek kształtu boku zęba może być przeprowadzony na wszystkich lub na wybranych zębach (rys. 5.). W każdym przypadku można mierzyć jeden lub dwa boki zęba.



Rys. 5. Analiza odchyłek powierzchni bocznej zęba

Rys. 5. przedstawia siatkę topograficzną boku koła zębatego z liczbowymi wartościami odchyłek, zmierzonymi w poszczególnych węzłach siatki. Dominującą charakterystyką jest wichrowatość powierzchni. Odchyłki powierzchni bocznej charakteryzują pewną regularność, nierównomierny rozkład odchyłek zwiększający się od podstawy zęba i rosnący w miarę zbliżania się do wierzchołka zębów. Podobne pomiary kół zębatach walcowych o zębach prostych nie wykazywały takiej charakterystyki. Taki błąd jest charakterystyczny dla modeli wykonywanych metodą SLA. Przyczyną nierównomiernego rozkładu odchyłek są zjawiska skurczu materiału (usytuowanie koła i kształt powoduje, że są powierzchnie mające tendencję do przemieszczeń) oraz „przepalania” pierwszej warstwy (proces sieciowania pod wpływem impulsów lasera).

Dokładniejsze wyjaśnienie wszystkich tych procesów wymaga podjęcia dalszych wnikliwych prac badawczych i analiz.

#### 4. WNIOSKI

Każdy pomiar zarysu lub linii zęba do niedawna wymagał jedynie dwóch osi ( $x, y$ ). Warunkiem koniecznym pomiaru uzębień o trzech osiach była dokładna kalibracja układu. Obecnie do realizacji wszystkich zadań pomiarowych na uzębieniu należy użyć maszyn pomiarowych 4 lub 5 osiowych.

Rozwój systemów CAD, maszyn sterowanych CNC w tym współrzędnościowych maszyn pomiarowych istotnie rozszerza wszystkie



zadania pomiarowe. Ponadto tematyka pomiarów kół zębatach ograniczała się w głównej mierze do pomiaru kół stalowych. Nabycie doświadczenia i stworzenie metodyki pomiarów kół wytwarzanych metodami szybkiego prototypowania, stanie się podstawą pomiaru kół zębatach wykonywanych różnymi metodami, bez względu na kształt zarysu zęba.

Zdefiniowanie pojęć odchylenia i odchyłek jako parametrów metrologicznych jednoznacznie opisujących wpływ błędów wykonania modeli może służyć do bezpośredniego wyznaczania wartości korekcy dla urządzeń RP, a w dalszej kolejności dla maszyn technologicznych w cyklu produkcyjnym. Dekompozycja odchyłek powierzchni na odchyłki elementarne ma na celu wyizolowanie poszczególnych parametrów ustawczych urządzeń RP, które w dominujący sposób wpływają na powstające odchyłki. Przewiduje się tego typu eksperymenty, czy i jak można wprowadzać korekty urządzeń RP i jak one wpływają na niedokładności modeli SLA.

#### **LITERATURA**

- [1]AGMA2009-B01 Bevel Gear Classification, Tolerances, and Measuring Methods
- [2]PN-EN ISO 1036041:2002 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 4: CMM stosowane w trybie pomiaru skaningowego
- [3]PN-EN ISO 10360-5:2003 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 5: CMM z zespołem głowic pomiarowych wielotrzpieniowym
- [4]*Praca zbiorowa pod redakcją Humiennego Z.: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Podręcznik europejski*, WNT, Warszawa 2004
- [5]*Ratajczyk E.: Współrzędnościowa technika pomiarowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005

#### **APPLYING THE COORDINATE MEASURING TECHNIQUE AND CAD SYSTEMS TO MEASURE CHOSEN DEVIATIONS OF HELICAL GEARS PRODUCED BY RAPID PROTOTYPING**

#### **SUMMARY**

*The article presents the possibilities of using the standard CMM software for measuring gears. CATIA V5 software enables increasing the rapid and the accuracy of processing data obtained from measurements. The researches were made to define the tooth's profile deviations and flank.*

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2009 jako projekt badawczy rozwojowy (R03 021 02)