

# **WYKORZYSTANIE LASEROWEGO SKANERA 3D ORAZ WSPÓŁRZĘDNOŚCIOWEJ MASZyny POMIAROWEJ DO BUDOWY I OCENY MODELU KOŁA ZĘBATEGO**

Piotr ZGÓRNIAK<sup>1</sup>, Wojciech STACHURSKI<sup>1</sup>,

## **1. WPROWADZENIE**

Ze względu na szeroki rozwój przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, rolniczego, obserwuje się ciągle rosnące zapotrzebowanie na wytwarzanie kół zębatach. Ich niezawodna praca jest uwarunkowana wieloma czynnikami związanymi z technologią wykonania, obróbką cieplną, doбором materiału konstrukcyjnego. Efekty tych działań można zweryfikować jedynie poprzez sprawdzenie czy nasz produkt finalny spełnia określone wymagania. W tym właśnie zadaniu szczególną rolę odgrywa kontrola jakości. Jak wiadomo, aby przekładnia zębata charakteryzowała się niezawodnością, cichobieżnością oraz pełną zamiennością części składowych niezbędna jest ocena dokładności geometrycznej kół zębatach. W dziedzinie metrologii również obserwuje się coraz częściej wykorzystanie technik inżynierii odwrotnej a w szczególności wykorzystywanie danych uzyskanych ze skanerów 3D do oceny dokładności geometrycznej elementów maszyn i urządzeń. Coraz częściej można zaobserwować wykorzystanie różnego rodzaju urządzeń skanujących ręcznych, mocowanych na przenośnych ramionach pomiarowych bądź droższych rozwiązań bazujących na skanerach światła strukturalnego.

## **2. WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH**

Do analizy modelu koła zębatego oraz do wykonania modelu CAD, będącego plikiem referencyjnym w dalszych pomiarach współrzędnościowych, wykorzystano ramię pomiarowe Infinity 2 firmy CimCore z zamontowaną laserową przystawką skanującą firmy Perceptron V4i. Widok ogólny stanowiska do skanowania 3D został

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i TBM, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

przedstawiony na rys. 1, a podstawowe dane techniczne ramienia pomiarowego zestawiono w tabeli 1.



Tabela 1. Parametry techniczne ramienia pomiarowego CIMCORE Infinity 2.0 [1]

Zakres pomiarowy:	2,4 m
Dokładność wg testu A [mm] – Test pojedynczego punktu na kulce kalibracyjnej	$\pm 0,013$ mm
Dokładność wg testu A [mm] – Test powtarzalności punktu	$\pm 0,020$ mm
Dokładność wg testu C [mm] – Test przestrzennej dokładności liniowej	$\pm 0,029$ mm
Metody określania dokładności (wszystkie dla $\pm 2\sigma$ )	

Rys. 1. Ramię pomiarowe CimCore Infinity 2.0 wraz z przystawką Perceptron v4i

W celu wykonania skanowania przestrzennego na końcowym przegubie ramienia pomiarowego zamontowano przystawkę laserową firmy Perceptron V4i.

Na podstawie danych technicznych przystawki laserowej dostarczonych przez producenta [1] w linii skaner rejestruje 768 punktów. Przy największej częstotliwości wyświetlania linii wynoszącej 30 Hz, prędkość skanowania wynosi 23040 punktów/sekundę. Rozdzielczość dla przystawki Perceptron v4i określona na kuli wzorcowej wynosi  $4.5 \mu\text{m}$  w przedziale ufności  $2\sigma$ . Powtarzalność według danych producenta wynosi  $5 \mu\text{m}$  natomiast dokładność w przedziale ufności 2 sigma wynosi  $24 \mu\text{m}$ .

Uwzględniając fakt, iż parametry techniczne ramienia pomiarowego oraz przystawki skanującej są błędami niezależnymi od siebie, całkowity błąd pomiarowy oszacowano jako sumę arytmetyczną błędów składowych. Niniejszy sposób oszacowania całkowitego błędu miał jedynie służyć stwierdzeniu, czy wykorzystanie tego typu sprzętu jest w ogóle uzasadnione do oceny tak dokładnych komponentów maszyn jakimi są koła zębate. Oznaczając błąd całkowity zestawu pomiarowego jako  $\Delta z_1$  określono jego wartość jako sumę algebraiczną błędu ramienia  $\Delta p_r = \pm 0,029$  mm oraz błędu przystawki laserowej  $\Delta p_{pl} = \pm 0,024$  mm. Oszacowana wartość całkowitego błędu zestawu wyniosła  $\Delta z_1 = 0.058 + 0.048 = 0,106$  mm w przedziale poziomu ufności  $2\sigma$ .

Autorzy artykułu zdają sobie sprawę, że ten sposób określenia błędu pomiarowego

zastawu może być krzywdzący dla wykorzystywanego sprzętu i powinien być on określony choćby na podstawie wykonania opracowania wyniku pomiaru wielokrotnego znanej wartości nominalnej np. płytek wzorcowych, kulek wałeczków. Ze względu na fakt, iż artykuł nie dotyczy określania błędu pomiaru zestawu pomiarowego zagadnienie to w dalszej części artykułu nie będzie poruszane, natomiast autorzy planują zająć się tym ciekawym zagadnieniem w kolejnych publikacjach naukowych.

Analizując oszacowaną wartość całkowitego błędu pomiarowego można mieć uzasadnione obawy, iż zastosowanie skanowania laserowego do oceny dokładności geometrycznej kół zębatach jest nieuzasadnione do oceny dokładnych kół zębatach klas 5-8. Jednak dla kół mniej dokładnych stosowanych na przykład w maszynach rolniczych oraz dla kół o większych gabarytach, gdzie pola tolerancji mają większą wartość może okazać się wystarczające. Pomimo faktu relatywnie małej dokładność zestawu do skanowania 3D postanowiono wykorzystać dane uzyskane ze skanera do porównania dokładności skanu 3D w stosunku do koła wygenerowanego w sposób automatyczny za pomocą modułu Engineering Reference w programie Solid Edge. Ten zabieg miał na celu stwierdzenie, czy i w jaki sposób można oceniać dokładność wymiarową koła zębatego. Parametry mierzonego koła podano w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe parametry koła zębatego określone na podstawie rysunku konstrukcyjnego koła zębatego

Liczba zębów	$z$	26
Moduł normalny	$m$	5
Luz wierzchołkowy	$c$	1.0
Kąt zarysu	$\alpha$	20°
Kąt pochylenia linii zęba	$\beta$	-
Kierunek pochylenia linii zęba		-
Współczynnik przesunięcia zarysu	$x$	0
Dokładność wykonania	$IT$	8
Długość wzdłuż wspólnej normalnej przez 4 zęby		
Średnica podziałowa	$d_p$	130 mm
Wysokość zęba		5

Do finalnego określenia dokładności geometrycznej koła zębatego posłużono się maszyną współrzędnościową firmy DEA Global Performance. Widok ogólny maszyny współrzędnościowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2 Widok ogólny maszyny współrzędnościowej DEA Global Performance

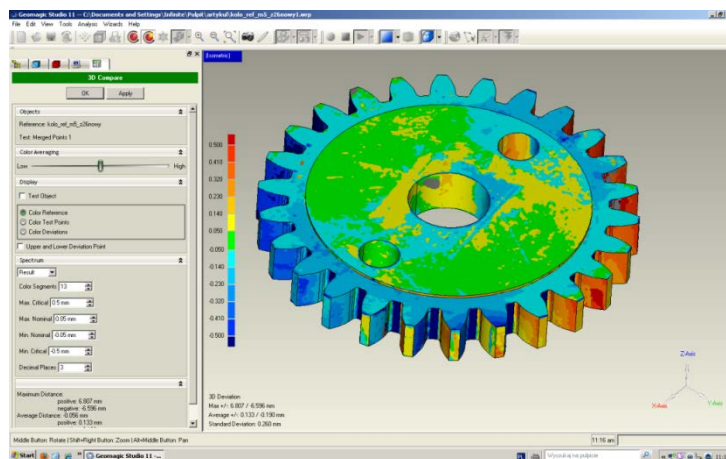
Tabela 3. Parametry techniczne maszyny współrzędnościowej DEA Global Performance [10]

Zakres pomiarowy:	500x500x500
Specyfikacja dokładności [ $\mu\text{m}$ ]	ISO 10360
$\text{MPE}_E = \text{od } 1.5 + 3.0 * L/1000$	
$\text{MPE}_{\text{THP/T}} = \text{od } 2.9 \mu\text{m} / 45 \text{ s}$	

### 3. METODYKA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia zaplanowanych pomiarów dotyczących określenia dokładności koła zębatego wykonanego metodą dłutowania Fellowsa, konieczne było podjęcie następujących działań.

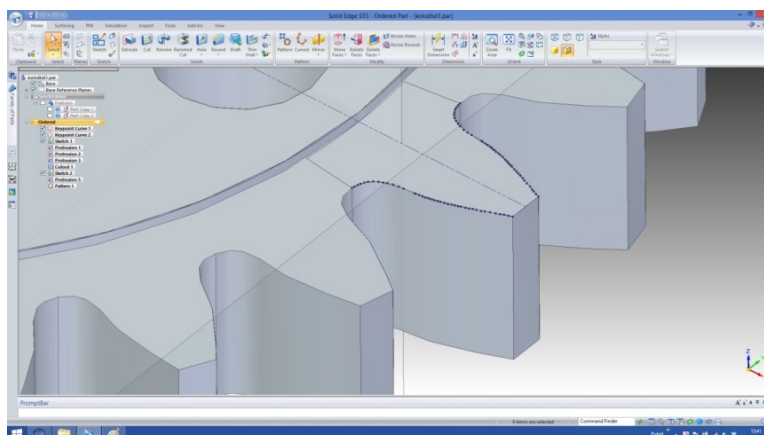
W pierwszym etapie dokonano wstępnej oceny koła zębatego za pomocą konwencjonalnych technik pomiarowych. Następnie na ich podstawie za pomocą programu Solid Edge stworzono model koła zębatego wykorzystując moduł Engineering Reference. Następnie wykonano skanowanie rzeczywistego koła zębatego. Na podstawie porównania uzyskanej chmury punktów ze skanera stwierdzono znaczne różnice szczególnie w obszarze linii przejściowej w pobliżu średnicy den wrębów. Przykład analizy wykonanej w programie Geomagic Studio wskazuje, że geometria koła zęba w pobliżu średnicy den wrębów znacznie odbiega od geometrii uzyskanej w programie CAD. Nie jest tajemnicą, że promień przejściowy różni się w zależności od zastosowanej technologii wykonywania kół zębatych. Koło zębate wykorzystane do celów niniejszego artykułu zostało wykonane poprzez dłutowanie Fellowsa, które charakteryzuje się inną geometrią niż ma to miejsce podczas frezowania obwiedniowego. Przykład analizy porównującej geometrię modelu CAD z modułu Engineering Reference, z chmurą punktów



Rys. 3. Analiza 3D geometrii koła oraz chmury punktów uzyskanej podczas skanowania

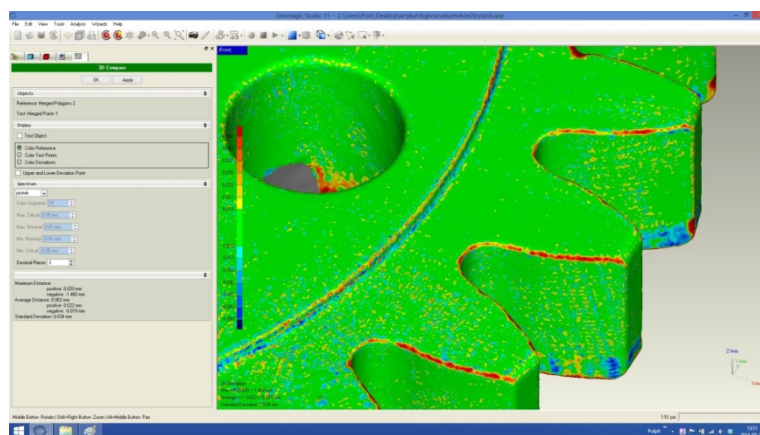
Na podstawie przeprowadzonej analizy autorzy doszli do wniosku, iż przyjmowanie automatycznie uzyskanej geometrii zębów kół zębatych nie daje jednoznacznych wyników oceny dokładności koła zębatego.

W drugim etapie postanowiono wykonać model CAD koła zębatego na bazie uzyskanej chmury punktów ze skanera 3D. Ponieważ obiekt rzeczywisty charakteryzuje się nierównomierną podziałką postanowiono przyjąć jako ząb bazowy ząb o numerze 1, którego środek pokrywa się z osią x przyjętego układu współrzędnych. Widok koła zaprojektowanego na bazie danych uzyskanych ze skanera laserowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Model 3D koła zębatego zaprojektowany na podstawie danych ze skanera laserowego

Kolejnym krokiem było przeprowadzenie ponownej analizy 3D modelu koła zębatego stworzonego na bazie skanowania w programie Solid Edge oraz chmury punktów uzyskanej podczas skanowania zestawem zaprezentowanym na rys. 1. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Analiza 3D dotycząca sprawdzenia poprawności wykonania modelu CAD koła zębatego w porównaniu z chmurą punktów uzyskaną ze skanera

Na podstawie wyników uzyskanych z analizy 3D stwierdzono dobrą zgodność modelu CAD w stosunku do pierwszego zęba bazowego. W tej analizie jako wartości nominalne określono zakres  $\pm 0.01$  mm a jako wartości krytyczne  $\pm 0.1$  mm. W przypadku wyników zaprezentowanych na rys. 3 zakres wartości nominalnych wynosił  $\pm 0.05$  mm a zakres wartości krytycznych  $\pm 0.5$  mm. Pomimo zawężenie obszaru analizy 3D uzyskano zadowalające według autorów wyniki. Dane dotyczące bocznych powierzchni roboczych zęba mieszczą się w zakresie nominalnym. Jedynie w miejscach fazowań, które nie zostały uwzględnione w modelu CAD obserwuje się większe różnice. Jest to spowodowane trudnościami skanera 3D w akwizycji punktów z ostrych obszarów, jakimi są krawędzie oraz faktem niezamodelowania sfazowań w programie Solid Edge. Ponieważ inspekcja rzeczywistego koła zębatego na maszynie współrzędnościowej nie obejmowała obszarów sfazowań, uznano za bezzasadne poprawianie modelu CAD koła zębatego w tych obszarach.

Ocena dokładności geometrycznej koła zębatego na maszynie współrzędnościowej został podzielona na dwa etapy. W pierwszym przypadku wykorzystano specjalistyczny program PC-DMIS Gear v. 2.3, którego głównym zadaniem jest inspekcja typowych kół zębatych. Podstawową jego zaletą jest brak konieczności wykonywania modelu CAD jako referencji do pomiarów. Ten fakt znacznie ułatwia i przyspiesza proces inspekcji kół zębatych. Na podstawie danych geometrycznych, tj. liczby zębów, modułu, kąta przyporu, kąta linii zęba, szerokości wieńca, współczynnika korekcji, typu koła zębatego (koło o zębach prostych o uzębieniu

zewnątrznym) program w procedurze półautomatycznej dokonuje bazowania koła zębatego oraz przyjmuje lokalny układ współrzędnych. Następnie po wyborze interesujących parametrów program automatycznie dokonuje inspekcji koła zębatego.

Na podstawie danych dotyczących geometrii koła zębatego oraz rodzajów pomiarów jakie są nam potrzebne do ewaluacji koła zębatego, program generuje automatycznie raport z wynikami pomiarów. Na jego podstawie jesteśmy w stanie stwierdzić do jakiej klasy IT należy sprawdzane koło i jaki parametr ją determinuje.

Wyniki uzyskane za pomocą programu PC- DMIS Gear są w większości przypadków wystarczające, natomiast sam program nie umożliwia dostępu do „surowych” danych pomiarowych, a tym samym może okazać się niewystarczający do bardziej zaawansowanych analiz. Jest on swego rodzaju nakładką programu PC-DMIS. Jeżeli mamy dostęp do tego specjalistycznego programu to w większości przypadków bezcelowe jest wykonywanie pomiarów z wykorzystaniem modelu referencyjnego. Natomiast, gdy jesteśmy zainteresowani konkretnymi danymi, których nie możemy uzyskać z programu PC-DMIS Gear albo po prostu nie mamy do niego dostępu konieczne jest wykorzystanie pliku CAD jako referencji i napisania własnego programu pomiarowego. Autorzy postanowili sprawdzić, czy da się uzyskać interesujące ich dane w standardowej wersji programu PC- DMIS. W tym celu do przestrzeni roboczej programu PC-DMIS wczytano model CAD zbudowany na bazie danych ze skanera 3D. Do budowy lokalnego układu współrzędnych wykorzystano górną płaszczyznę koła jako poziom zero odpowiadający kierunkowi Z. Oś X zbudowano na bazie punktów środka otworu osadczego oraz prawego otworu indeksującego. Początek układu współrzędnych znajduje się w środku otworu osadczego. Następnie postanowiono zmierzyć interesujące średnice, a w szczególności średnice otworu osadczego, średnicy wierzchołkowej oraz średnicy stóp. W celu sprawdzenia geometrii części ewolwentowej zębów oraz promieni przejściowych zastosowano punkty wektorowe, których współrzędne nominalne odpowiadały geometrii koła uzyskanego ze skanowania 3D. Na każdym boku zęba umieszczono 6 punktów pomiarowych rozmieszczonych na czterech poziomach w kierunku Z.

Miejsce przyjętego układu współrzędnych zostało zaprezentowane na przykładowym widoku interfejsu graficznego programu PCDMIS (rys. 6). Ponadto różne kolory punktów wektorowych reprezentują odchyłki od modelu zbudowanego na bazie skanowania 3D.

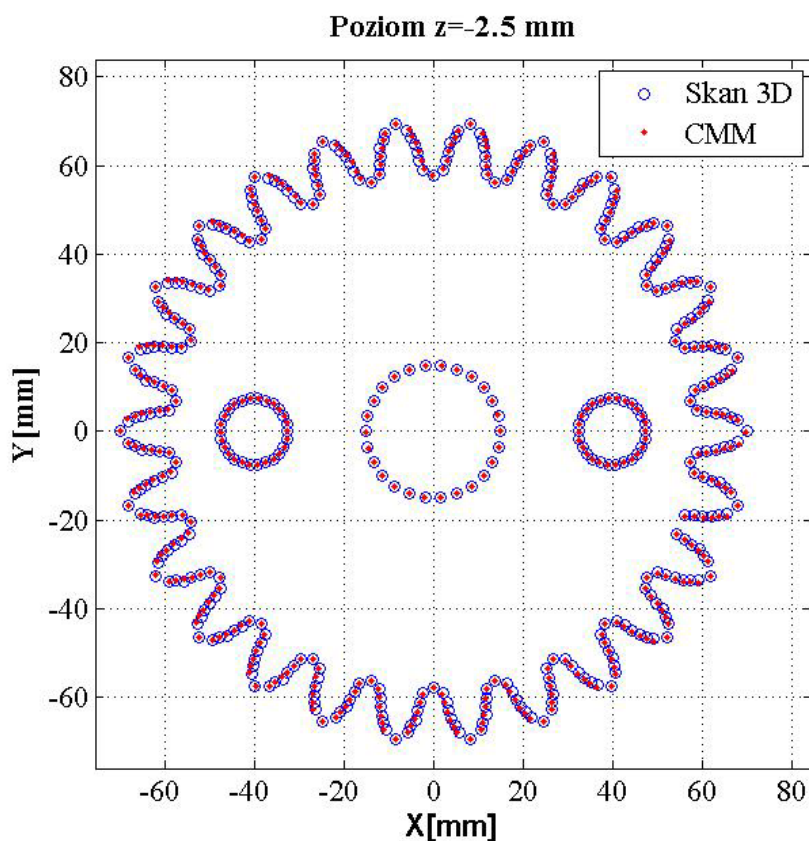
Przykładowy raport przedstawiono na rys. 7. Wyniki dotyczą grubości zębów. Wartości pól tolerancji zostały przyjęte dla 8 klasy dokładności. Wartości umieszczone w kolumnie NOMINAL dotyczą koła zbudowanego na bazie skanowania 3D natomiast wartości w kolumnie MEAS dotyczą wyników uzyskanych na podstawie pomiarów maszyną współrzędnościową. Zakładając, że pomiar dotykowy jest dokładniejszy sugeruje się ponowne wykonanie modelu CAD koła zębatego na bazie pomiarów dotykowych. Wczytanie modelu do przestrzeni roboczej programu PCDMIS oraz przeprowadzenie procedury pomiarowej.





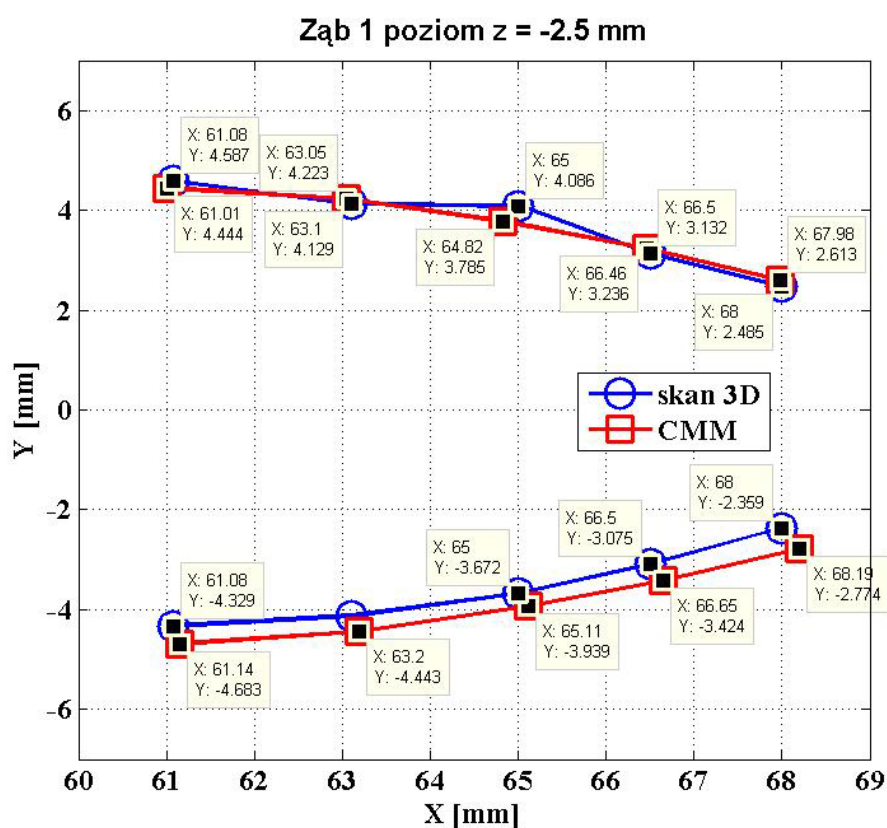
#### 4. WYNIKI POMIARÓW

Plan badań obejmował wykonanie pomiarów na czterech poziomach w kierunku osi  $z = (-2.5, -5.5, -8.5$  oraz  $-11$  mm). Ze względu na ograniczenia długości końcówki pomiarowej postanowiono ostatni poziom  $z = -11$  mm dla otworu osadczego oraz dwóch otworów indeksujących zastąpić poziomem  $z = -10$  mm. W przypadku punktów na ewolwentach zębów kół zębatych, punktów odpowiadających średnicom den wrębów i wierzchołkowej oraz punktów na promieniach przejściowych w pobliżu koła zasadniczego ostatni poziom w kierunku  $z$  wynosił  $-11$  mm. Wartości ujemne są związane ze sposobem przyjęcia lokalnego układu współrzędnych na maszynie współrzędnościowej. Po zapisaniu danych w formacie Microsoft Excel dokonano analizy uzyskanych wyników. Przykład wyników dotyczących jednego poziomu ( $z = -2.5$  mm) punktów zarejestrowanych na podstawie pomiarów współrzędnościowych zaprezentowano na rys. 8.



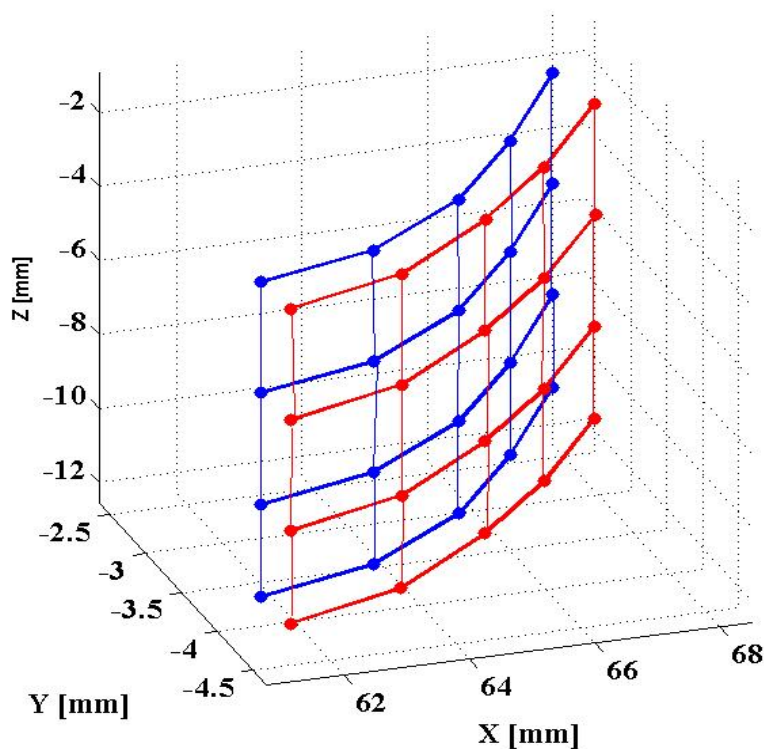
Rys. 8. Porównanie współrzędnych punktów uzyskanych poprzez skanowanie laserowe oraz pomiar za pomocą maszyny współrzędnościowej

W celu określenia takich parametrów koła zębatego jak grubość zęba, kąt pochylenia linii zęba czy podziałkę można do tego celu wykorzystać współrzędne punktów uzyskanych z pomiarów współrzędnościowych. Na rys. 9 podano wyniki dotyczące pierwszego zęba bazowego na poziomie  $z = -2.5$  mm. W celu wyznaczenia błędów profilu ewolwentowego powinno się przyjąć większą liczbę punktów kontrolnych na powierzchni bocznych zębów. Liczba 5 punktów na powierzchni ewolwentowej zęba została przyjęta arbitralnie w celu przedstawienia metody. Podobna sytuacja dotycząca liczby 4 poziomów wyznaczanych w kierunku osi Z w celu wyznaczenia linii zębów (rys. 10).



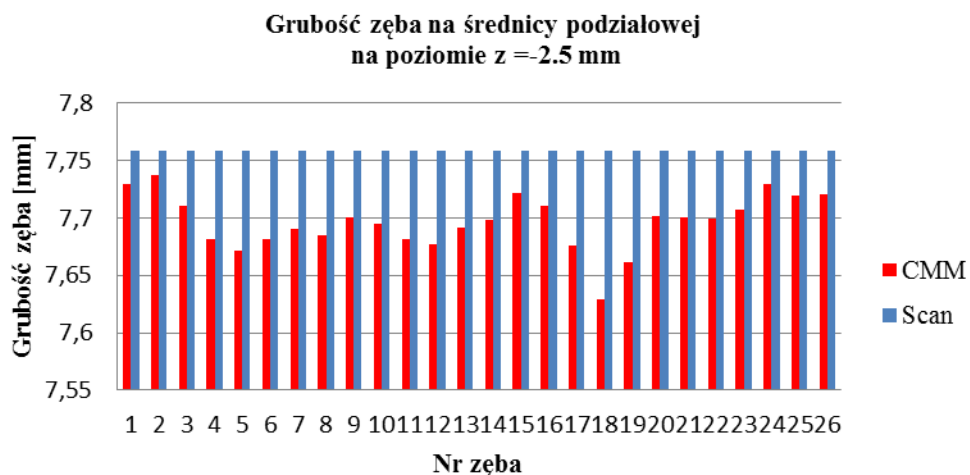
Rys. 9. Wyniki dotyczące współrzędnych punktów kontrolnych uzyskanych za pomocą skanowania 3D oraz pomiaru maszyną współrzędnościową

### Wyniki dotyczące prawej flanki zęba nr 1



Rys. 10. Wyniki dotyczące jednej powierzchni roboczej zęba na wszystkich mierzonych poziomach w kierunku osi z

Analizując wyniki zaprezentowane na rys. 9 i rys. 10 zauważono, że dolna strona zęba 1 w przypadku pomiaru maszyną współrzędnościową charakteryzuje się zewnętrznym ułożeniem względem odpowiadającej jej powierzchni zęba uzyskanej ze skanu 3D. Jednak analizując rys. 9 widać, że górna strona powierzchni bocznej zęba uzyskana ze skanowania przecina się z powierzchnią uzyskaną na maszynie współrzędnościowej. W celu klarownego zaprezentowania wyników postanowiono przedstawić wyniki grubości wszystkich zębów na średnicy koła podziałowego. Dla przykładu, na rys. 11, przedstawiono wyniki dotyczące zmienności grubości zęba na średnicy podziałowej mierzonych na poziomie  $z = -2.5$  mm. Wyniki dotyczące grubości zęba uzyskane z modelu referencyjnego zbudowanego na bazie jednego zęba skanowanego mają tę samą wartość. Ten fakt wynika z przyjętej metodyki badań eksperymentalnych.



Rysunek 11. Zmienność grubości zęba na średnicy podziałowej na poziomie  $z = -2.5$  mm

Na jego podstawie możemy stwierdzić, że zęby koła uzyskane w technologii skanowania 3D mają większy wymiar w porównaniu do grubości zębów uzyskanych na podstawie pomiarów współrzędnościowych.

## 5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie technik inżynierii odwrotnej daje bardzo duże możliwości oceny dokładności kształtowo-wymiarowej od strony specjalistycznego oprogramowania. Wykorzystanie skanerów trójwymiarowych do inspekcji dokładnych części typu koła zębate może być obarczone dużymi błędami. Na ten fakt składają się trudności akwizycji punktów pomiarowych z obszaru krawędzi, głębokich otworów szczególnie o małej średnicy. Dodatkowym czynnikiem zakłócającym są trudności w skanowaniu powierzchni odbłaskowych, polerowanych, transparentnych itp. Stosowanie substancji antyrefleksyjnych poprawia jakość uzyskiwanych skanów natomiast zmienia wymiary skanowanych obiektów. Ponadto proces nakładania warstwy antyrefleksyjnej nie jest powtarzalny i wiąże się z koniecznością mycia elementów sprawdzanych. W celu przyspieszenia procesu inżynierii odwrotnej mającej na celu tworzenie modeli referencyjnych sugeruje się dokładne skanowanie mniejszej ilości elementów powtarzalnych i tworzenie modeli na bazie wyselekcjonowanej pod względem dokładności chmurze punktów. Kluczowym zagadnieniem jest odpowiedni wybór sprzętu pomiarowego do realizowanych celów. W skanerach obsługiwanych ręcznie istnieje konieczność dopasowywania do siebie chmur punktów z wielu skanów co również nie jest obojętne na uzyskiwaną dokładność skanowania. Nowoczesne rozwiązania skanerów działających na zasadzie światła strukturalnego [8, 9] znacznie

polepszają jakość oraz skracają czas potrzebny do uzyskania skanów natomiast nadal nie dają dokładności pomiarowej rzędu mikrometrów.

#### LITERATURA

- [1] OBERON 3D – Specyfikacja techniczna – oferta nr MK/CC/331c/9 rok 2009.
- [2] WRÓBEL I., *Inżynieria odwrotna jako metoda tworzenia cyfrowych modeli przedmiotów o skomplikowanych kształtach*. W: Mechanik 3, 2010, 212-214.
- [3] KOWALSKI M., KOWALSKI M., PASZKIEWICZ R., KUCZKO W., WICHNIAREK R., ZAWADZKI P., *Automatyzacja procesu skanowania na podstawie danych pozyskanych z pomiarów fotogrametrycznych*. W: Postępy nauki i techniki 7, 2011, 109-119.
- [4] GAO J., CHEN X., ZHENG D., YILMAZ O., GINDY N., *Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application*. W: Advances in Engineering Software 37, 2006, 592-600.
- [5] ZEXIAO X., JIANGUO W., QIUMEI Z., *Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system*. W: International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 2005, 1474-1486.
- [6] SANSONI G., DOCCHIO F., *Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications*. W: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 20, 2004, 359-367.
- [7] STĘPIEŃ K., MAKIEŁA W., *An analysis of deviations of cylindrical surfaces with the use of wavelet transform*, W: Metrology and Measurement Systems, No. 1, Vol. XX, 2013, 139-158.
- [8] [www.smarttech3d.com](http://www.smarttech3d.com).
- [9] [www.gom.com/metrology-systems/3d-scanner.html](http://www.gom.com/metrology-systems/3d-scanner.html).
- [10] [www.hexagonmetrology.pl/DEA-GLOBAL-Silver-Performance\\_120.htm#U5a73xa0Pgg](http://www.hexagonmetrology.pl/DEA-GLOBAL-Silver-Performance_120.htm#U5a73xa0Pgg).