

## Analiza porównawcza badań pól powierzchni przekrojów.

**Streszczenie.** Celem pracy było porównanie pól powierzchni trzech różnych elementów za pomocą dwóch maszyn: tomografu komputerowego Metrotom 800 oraz maszyny optycznej OGP Zip. We wszystkich przypadkach zauważono istotny wpływ kroku próbkowania na wyniki największy wpływ podczas pomiaru elementów krzywoliniowych. Przeprowadzona analiza MANOVA wykazała ponadto, że istnieją istotne różnice w wynikach pomiarów uzyskanych na obu maszynach pomiarowych

**Abstract.** The aim of the study was to compare the surface areas of three different elements using two machines: computer tomograph Metrotom 800 and optical machine OGP Zip. In all cases, significant influence of the sampling step on the results was noted. The greatest impact was noticed when measuring the curvilinear elements. The MANOVA analysis also revealed that there are significant differences in the results of measurements obtained from both measuring machines. (**Comparative analysis of research of cross section areas of machine elements**).

**Słowa kluczowe:** analiza pól powierzchni, tomografia komputerowa, pomiary optyczne.

**Keywords:** analysis of cross section areas, computed tomography, optical measurements.

doi:10.12915/pe.2014.08.51

### Wprowadzenie

We współczesnym przemyśle coraz bardziej istotną kwestią jest jakość i dokładność wykonania elementów. W celu spełnienia tych wymagań i w celu zwiększenia efektywności produkcji oraz zmniejszenia ilości odrzutów firmy inwestują w działy kontroli jakości zaopatrując je we współrzędnościowe urządzenia pomiarowe [1,2,3]. W zależności od charakteru produkcji, wymagań dokładnościowych, gabarytów sprawdzanych detali, parametrów, które mają być sprawdzane i wielu innych czynników dobierane są odpowiednie urządzenia, mogą to być między innymi: klasyczne maszyny współrzędnościowe, ramiona pomiarowe, skanery 3d, maszyny optyczne lub tomografy komputerowe [4,5]. W referacie przedstawiono możliwości pomiarowe na przykładzie tomografu komputerowego CT i optycznej maszyny pomiarowej.

### Urządzenia pomiarowe

Badania zostały przeprowadzone na: przemysłowym tomografie komputerowym METROTOM 800 firmy Zeiss oraz multisensorycznej maszynie pomiarowej ZIP lite firmy OGP. Urządzenia te umożliwiają bezpośredni pomiar pola powierzchni. Widoki wymienionych urządzeń pomiarowych podczas pomiarów przedstawiają rysunki 1 i 2.



Rys.1. Element pomiarowy wewnątrz komory tomografu METROTOM 800.

### Przebieg badań

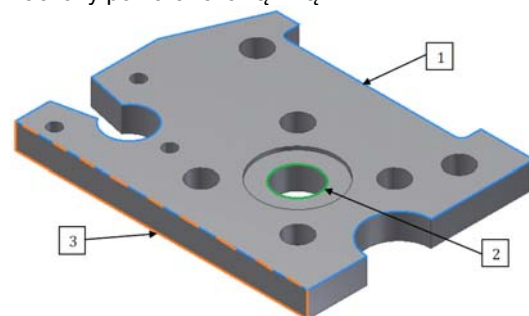
Wybór elementu pomiarowego został dokonany na podstawie analizy możliwości obu stosowanych urządzeń oraz w celu sprawdzenia poprawności wyznaczania pól powierzchni figur geometrycznych (okrąg, prostokąt) jak i bardziej skomplikowanych elementów (krzywa). Wybrane figury charakteryzują całą grupę elementów: okrąg - element krzywoliniowy, prostokąt - element składający się z

linii prostych, kontur zewnętrzny będący połączeniem linii i łuków.



Rys.2. Widok maszyny optycznej OGP podczas wykonywania pomiaru.

Rysunek 3 przedstawia model badanego detalu wraz z zaznaczonymi elementami, których pola powierzchni będą wyznaczane: 1 - kontur zewnętrzny, zaznaczony niebieską linią; 2 - okrąg, zaznaczone zieloną linią; 3 - prostokąt, zaznaczony pomarańczową linią.

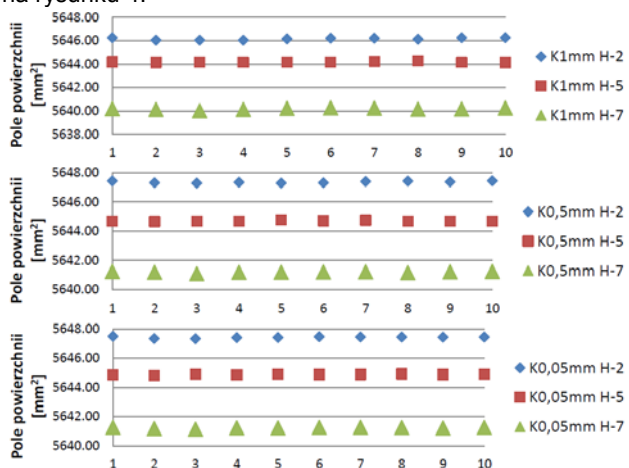


Rys.3. Widok mierzonego elementu.

Podczas badań zweryfikowano również wpływ ustawionego kroku próbkowania na uzyskane wartości pól powierzchni. Dla obydwu urządzeń pomiarowych przyjęto identyczne kroki próbkowania wynoszące: 1,00; 0,50 i 0,05 mm. Wykonana analiza ma dostarczyć odpowiedzi na następujące pytania: czy występują różnice w wartościach pól powierzchni zmierzonych na obu maszynach i czy są to istotne różnice, co miało wpływ na otrzymane wyniki oraz jakie detale powinny być mierzone na każdej z maszyn? Badania zostały przeprowadzone przy udziale mgr inż. Arkadiusza Markowskiego przy współudziale autorów.

## Wyniki

W pierwszej kolejności przeprowadzono pomiary konturu zewnętrznego na tomografie przy zastosowaniu oprogramowania CALYPSO. Kontur mógł być wyznaczany na różnych wysokościach, dlatego zdecydowano wyznaczyć trzy krzywe (kontury) w różnych odległościach (2 mm, 5 mm, 7 mm) od płaszczyzny górnej, dzięki temu sprawdzono prostopadłość ścianek bocznych do płaszczyzny górnej. Każda krzywa wyznaczana była z trzema krokami próbkowania: 1mm (oznaczenie K1), 0,5 mm (K2) oraz 0,05 mm (K3). Dało to informację jaki wpływ na wartość pola powierzchni mają odstępy między poszczególnymi punktami. Pomiary detalu wykonano dziesięciokrotnie. Wyniki pomiarów przedstawiają wykresy na rysunku 4.

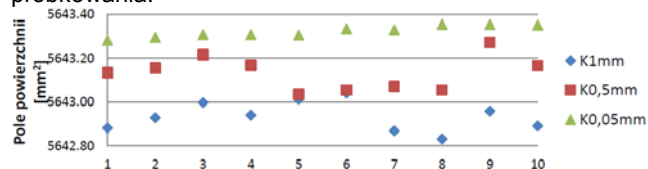


Rys.4. Graficzna ilustracja wyników pomiaru konturu zewnętrznego na tomografie.

W idealnym przypadku, dla danego kroku próbkowania wartości pól powierzchni powinny być sobie równe. Na podstawie wykresów można jednoznacznie stwierdzić, że pole powierzchni konturu w dużej mierze zależy od wysokości pomiarowej. Oznacza to, że kontur detalu został wycięty pod pewnym kątem różnym od kąta prostego. W płaszczyźnie powierzchni górnej pole powierzchni konturu jest największe i wynosi ok. 5647,5 mm<sup>2</sup>, w miarę oddalania od powierzchni górnej pole powierzchni maleje, aż do wartości ok. 5641 mm<sup>2</sup>. Jak łatwo policzyć różnica wartości pól powierzchni w skrajnych przypadkach spowodowana nieprostym wycięciem konturu detalu wynosi ok. 6,5 mm<sup>2</sup> co stanowi 0,115% zmian. Wartości pól powierzchni zależą również od kroku próbkowania, a więc odległości między kolejnymi punktami pomiarowymi. Z wykresów na rysunku 4 wyraźnie widać, że krok próbkowania wpływa na wartość pola powierzchni: w skrajnych przypadkach różnica ta wynosi 1,5 mm<sup>2</sup> (0,027%). Im mniejsze odstępy między punktami tym pole powierzchni jest większe, dzieje się tak, mimo że punkty tworzące krzywą łączone są ze sobą prostymi i łukami. Jest to spowodowane tym, że w przypadku gdy punkty oddalone są od siebie często łączone są w nieodpowiedni sposób np. nie uwzględniając zaokrąglenia – za pomocą prostych lub uwzględniając zaokrąglenie lecz ze złym promieniem łuku. Na wykresach można również zauważyć, że zmiana kroku próbkowania o połowę, a więc z kroku 1 mm na 0,5 mm daje znaczną zmianę wartości pola powierzchni – 1 mm<sup>2</sup>. Kolejne dziesięciokrotne zmniejszenie kroku próbkowania – z 0,5 mm na 0,05 mm wpływa nieznacznie na wartość pola powierzchni (w skrajnych przypadkach zmiana wynosi 0,2 mm<sup>2</sup>).

Na maszynie optycznej w programie MeasureMind 3D MultiSensor kontur wyznaczany jest za pomocą opcji śledzenia konturu. Nie mierzono krzywych na różnych

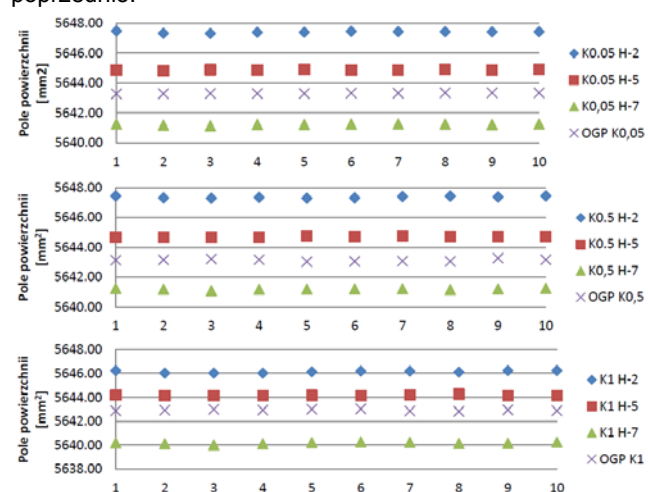
wysokościach ze względu na to, że maszyna OGP jest w stanie wyznaczyć tylko kontur na jednej wysokości, a więc widok „z góry”. Po wskazaniu punktu startowego i końcowego, maszyna „podąża” wzdłuż konturu, zbierając punkty z określonym wcześniej odstępem, tak zwanym krokiem próbkowania, po czym automatycznie zebrane punkty są łączone prostymi i wyznaczane jest pole powierzchni utworzonego konturu zewnętrznego. Pomiary detalu wykonano dziesięciokrotnie z trzema krokami próbkowania: 1 mm, 0,5 mm oraz 0,05 mm. Rysunek 5 przedstawia wykres zależności pól powierzchni od kroku próbkowania.



Rys.5. Wyniki pomiarów konturu zewnętrznego na maszynie optycznej OGP.

Oznaczenie K1mm, K0,5mm i K0,05mm należy rozumieć jako krok próbkowania wynoszący odpowiednio 1 mm, 0,5 mm, 0,05 mm. Na wykresie z rysunku 5 widoczna jest zależność pola powierzchni od kroku próbkowania. Podobnie jak w programie Calypso największe pole powierzchni zostało wyznaczone dla najmniejszych odstępów między punktami. Wraz ze zwiększaniem odstępów pole powierzchni maleje, w skrajnych przypadkach różnica między wartościami pól powierzchni wynosi ok. 0,5 mm<sup>2</sup> (0,009%). Spowodowane jest to algorytmem wyznaczania konturu, bowiem wszystkie punkty łączone są prostymi, więc w przypadku zaokrąglenia część danych jest pomijana. Przy zmianie kroku próbkowania z 1 mm na 0,5 mm wartość pola powierzchni zmieniała się o ok. 0,35 mm<sup>2</sup>, przy zmianie kroku próbkowania z 0,5 mm na 0,05 mm wartość pola powierzchni zmieniała się o niecałe 0,15 mm<sup>2</sup>.

Na podstawie wyników uzyskanych z obu maszyn widać, że pole powierzchni w dużym stopniu zależy od kroku próbkowania, jak również od wysokości pomiarowej (w przypadku oprogramowania Calypso). Na wykresach przedstawionych na rysunku 6 dokonano porównania wyników uzyskanych za pomocą dwóch urządzeń. Maszyny optycznej - oznaczenia OGP i tomografu oznaczenia jak poprzednio.

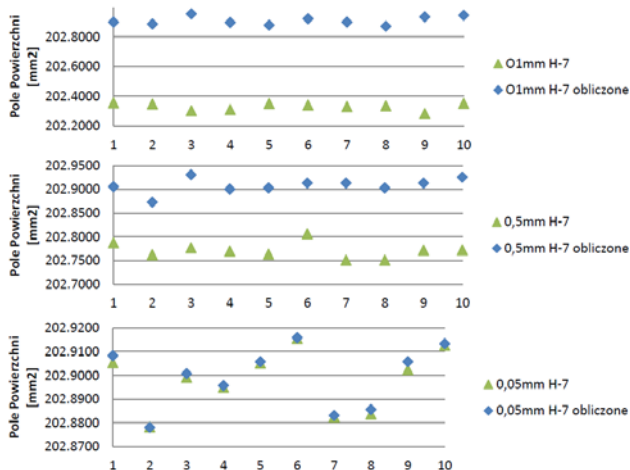


Rys.6. Zestawienie wyniki pomiarów konturu zewnętrznego obu stosowanych urządzeń.

Na podstawie wykresów z rysunku 6 można stwierdzić, że największy wpływ na różnice w wynikach pomiarów na obu maszynach miała wysokość, na której odbywał się

pomiar. Analizując wykresy można zauważyć, że wraz ze zwiększaniem wysokości pomiarowej na tomografie maleje pole powierzchni. Maszyna OGP podąża za konturem płytki, a więc mierzy pole powierzchni na maksymalnej wysokości kostki. Wynika z tego, że teoretycznie najbardziej zbliżone wyniki pomiarów wykonanych maszyną OGP i tomografem powinny być uzyskane dla jak największej wysokości pomiarowej (dla wykonanych pomiarów jest to wysokość 7 mm). Różnica między polem powierzchni na maszynie OGP a polem powierzchni otrzymanym na tomografie (na wysokości 7 mm) wynosi ok.  $2 \text{ mm}^2$  (zmiana o  $0,035\%$ ). Należy jednak pamiętać, że maszyna OGP, nie zbiera punktów tylko w jednej płaszczyźnie, mimo nawet bardzo dobrego ustawienia ostrości na daną płaszczyznę więc jeżeli powierzchnia boczna była powierzchnią wypukłą lub znajdowały się na niej zanieczyszczenia, pole powierzchni mogło zostać zwiększone.

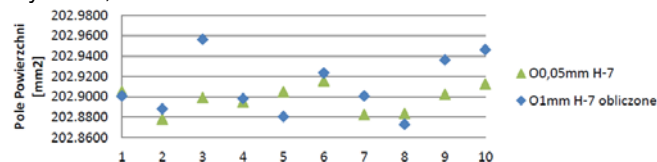
Pomiar okręgu na obu maszynach przeprowadzono dwoma sposobami: 1) Metodą automatyczną - pomiar krzywej, a następnie obliczenie pola powierzchni wewnątrz krzywej za pomocą algorytmu dostępnego w każdym z oprogramowań; 2) Metodą obliczeniową - pomiar średnicy otworu, a następnie obliczenie pola powierzchni okręgu za pomocą zależności matematycznej. Dzięki takiemu podejściu można było porównać algorytmy stosowane w obu oprogramowaniach. W referacie zaprezentowano analizę pomiaru tomograficznego okręgu tylko na wysokości pomiarowej 7 mm, ze względu na to, że trend wyników powtarzał się zarówno dla wysokości 5 mm, jak i 2 mm w analogiczny sposób jak dla pomiaru konturu.



Rys.7. Zestawienie wyniki pomiarów okręgu na tomografie.

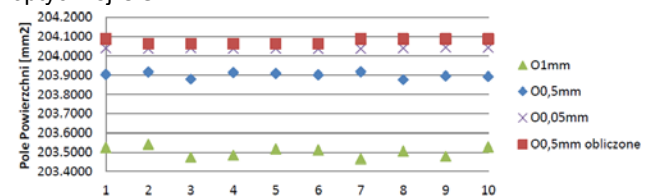
Analizując wykresy z rysunku 7 można dojść do wniosku, że wraz ze zmniejszaniem kroku próbkowania wyniki z obu metod są coraz bardziej zbieżne. Przy kroku 1 mm różnica wynosi ok.  $0,6 \text{ mm}^2$ , dla kroku 0,5 mm różnica zmniejsza się do ok.  $0,1 \text{ mm}^2$ , jednak cały czas występuje wyraźna różnica, zaś dla pomiarów z krokiem 0,05 mm różnica jest niemal niezauważalna. Na podstawie przedstawionych wyników można dojść do wniosku, że w przypadku stosowania metody automatycznej (wyznaczania pola powierzchni krzywej zamkniętej) należy stosować odpowiednio mały krok próbkowania, aby otrzymać wiarygodne wyniki - dla przeprowadzonych pomiarów krok ten wynosi 0,05 mm. Metoda obliczeniowa nie wymagała stosowania aż tak małego kroku próbkowania, odstępy między punktami równe 1 mm dawały zadowalający wynik, co widać na wykresie z rys. 8, gdzie porównano wyniki pomiarów pola powierzchni otworu metodą automatyczną (krok próbkowania 0,05 mm) z metodą obliczeniową (krok

próbkowania 1 mm). Maksymalna różnica w wynikach wynosi  $0,05 \text{ mm}^2$ .



Rys.8. Zestawienie wyniki pomiarów okręgu na tomografie dla metody automatycznej i obliczeniowej.

Można zatem stwierdzić, że algorytmy do wyznaczenia elementu stosowane w obu metodach są różne, jednak gdy zostaną dobrane odpowiednie parametry dla każdej z metod, wynik jest prawidłowy. Wykres z rysunku 9 przedstawia wyniki 10-krotnych pomiarów wykonanych z różnymi krokami próbkowania okręgu na maszynie optycznej OGP.

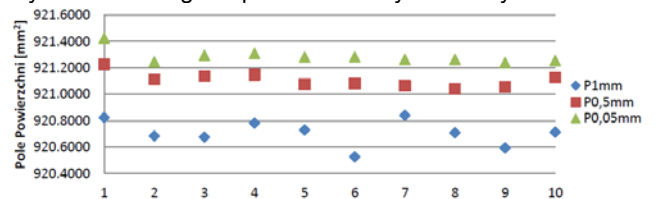


Rys.9. Zestawienie wyniki pomiarów okręgu na OGP dla metody automatycznej i obliczeniowej.

Wykres z rysunku 9 pokazuje, że metoda automatycznego wyznaczania pola powierzchni z krzywej zamkniętej pokrywa się z metodą obliczeniową dla kroku próbkowania 0,05 mm. Oznacza to, że błąd wynikający z aproksymacji krzywej prostymi jest pomijalnie mały dla kroku 0,05 mm.

Wyniki pomiarów na tomografie komputerowym jak i maszynie OGP potwierdziły, że krok próbkowania równy 0,05 mm jest na tyle mały, że eliminuje błąd aproksymacji. Różnica między polem powierzchni na maszynie OGP a polem powierzchni otrzymanym na tomografie (na wysokości 7 mm) wynosi ok.  $1 \text{ mm}^2$ . Główną przyczyną różnicy w wynikach otrzymanych za pomocą obu maszyn była wysokość na jakiej wykonywany był pomiar (maszyna OGP umożliwiała pomiary wyłącznie krawędzi, a tomograf komputerowy umożliwiał pomiary na każdej wysokości, ale nie na krawędzi).

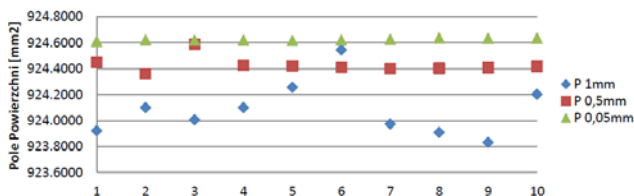
Analogiczne wyniki uzyskano w przypadku pomiaru ostatniego elementu którym był prostokąt. Zestawienie wyników z tomografu przedstawia wykres na rysunku 10.



Rys.10. Zestawienie wyniki pomiarów prostokąta na tomografie.

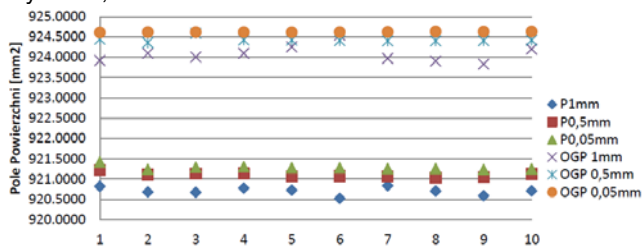
Dla największego kroku próbkowania wynoszącego 1mm wartość pola powierzchni jest najmniejsza i wynosi w przybliżeniu  $920,7 \text{ mm}^2$ . Wraz ze zmniejszaniem odstępów między punktami pole powierzchni rośnie i wynosi: ok.  $921,1 \text{ mm}^2$  dla kroku 0,5 mm oraz ok.  $921,3 \text{ mm}^2$  dla kroku 0,05 mm. Na rysunku 11 przedstawiono zestawienie wyników w zależności od kroku próbkowania uzyskanych z pomiaru prostokąta na maszynie optycznej OGP.





Rys.11. Zestawienie wyniki pomiarów prostokąta na maszynie optycznej.

Podobnie jak w przypadku pomiarów na tomografii najmniejsze pole powierzchni wynoszące ok. 924 mm<sup>2</sup> otrzymano dla największego kroku próbkowania – 1 mm. Wraz ze zmniejszaniem kroku próbkowania wartość pola powierzchni rosła: dla kroku wynoszącego 0,5 mm pole powierzchni było w przybliżeniu równe 924,4 mm<sup>2</sup>, a dla najmniejszego kroku 0,05 mm wyniosło ok. 924,6 mm<sup>2</sup>. Wykres z rysunku 12 przedstawia wyniki pola powierzchni prostokąta uzyskane przy użyciu dwóch maszyn. Pomiaru wykonano odpowiednio na tomografii komputerowej (oznaczenie P) oraz maszynie OGP. Wartość pola powierzchni uzyskanego na maszynie optycznej OGP Zip wynosi ok. 921 mm<sup>2</sup>, w przypadku pomiarów pola powierzchni tego samego prostokąta na tomografii komputerowej otrzymano wynik ok. 924,5 mm<sup>2</sup> różnica wynosi 0,380%.



Rys.12. Zestawienie wyniki pomiarów prostokąta na obu urządzeniach.

Na wymienioną różnicę mogło mieć wpływ kilka czynników: Na maszynie OGP pomiary wykonywano stosując podświetlenie od dołu, mierzony prostokąt znajdował się ok. 10cm nad stołem świetlnym, więc nie prostopadłość ścianek bocznych mogła mieć wpływ na zwiększenie pola powierzchni. W odróżnieniu do pomiarów krzywej zamkniętej czy okręgu, wynik pomiaru w dużo mniejszym stopniu zależał od kroku próbkowania, wynikało do głównie z charakteru mierzonego elementu, który składał się głównie z prostych.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów poddano dodatkowo analizie statystycznej przy pomocy oprogramowania Statgraphics [6]. Głównym zadaniem postawionym w pracy było sprawdzenie różnic w wynikach pomiarów wykonanych na dwóch różnych maszynach pomiarowych. Analizę wyników pomiarów przeprowadzono stosując wieloczynnikową analizę wariancji MANOVA (Multivariate Analysis Of Variance). Wszystkie wyniki na poziomie ufności 95%.

### Wnioski i podsumowanie

Celem pracy było porównanie pól powierzchni trzech różnych elementów za pomocą dwóch maszyn: tomografu

komputerowego Metrotom 800 oraz maszyny optycznej OGP Zip. Oba urządzenia różnią się zarówno pod względem budowy, istoty działania (praca tomografu komputerowego opiera się na promieniowaniu rentgenowskim, przenikającym przez badany detal, maszyna OGP działa na zasadzie pomiaru optycznego, umożliwiającego pomiar konturów), możliwości pomiarowych, jak również zastosowanych oprogramowań (Calypso, MeasureMind 3D). Niewątpliwą zaletą obu oprogramowań była możliwość bezpośredniego wyznaczenia pola powierzchni dowolnego kształtu, dzięki czemu sprawdzono jak rodzaj badanego elementu wpływa na wynik pomiaru, przeanalizowano również wpływ kroku próbkowania oraz metody pomiaru na wartość otrzymanego pola powierzchni.

Analiza pomiaru wszystkich mierzonych elementów na tomografii wykazała wpływ zarówno wysokości pomiarowej jak i kroku próbkowania. Wykonana analiza statystyczna potwierdziła wyniki i wykazała istotne różnice między wartościami uzyskanymi na różnych wysokościach pomiarowych oraz pomiędzy krokami próbkowania.

Kolejnym elementem było sprawdzenie wpływu kroku próbkowania dla pomiarów na maszynie optycznej. We wszystkich przypadkach zauważono istotny wpływ kroku próbkowania na wyniki, a największy wpływ podczas pomiaru elementów krzywoliniowych. Analiza statystyczna wykazała istotne różnice między wartościami uzyskanymi przy różnych krokach próbkowania.

Przeprowadzona analiza MANOVA wykazała ponadto, że istnieją istotne różnice w wynikach pomiarów uzyskanych na obu maszynach pomiarowych.

### LITERATURA

- [1] Ratajczyk E.: Współrzędnościowa Technika Pomiarowa. Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [2] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa w pomiarach geometrycznych 3D. Pomiary Automatyka Kontrola PAK vol. 57, nr 2/2011 s. 220-223
- [3] Ratajczyk E.: Tomografia komputerowa CT w zastosowaniach przemysłowych. Mechanik nr 2/2011, s.112-117; nr 3/2011, s.226-231; nr 4/2011 s.326-331
- [4] Gapiński B., Wieczorowski M., Marciniak-Podsada L., Dybala B., Ziolkowski G.: Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D. 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013
- [5] Wieczorowski M., Gapiński B.: X-ray CT in metrology of geometric feature. ACTA Tehnica Corviniensis - Bulletin of Engineering, Tome VII (2014), pp.95-100
- [6] Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa 2001.

**Autorzy:** mgr inż. Tomasz Kowaluk, Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, [t.kowaluk@mchtr.pw.edu.pl](mailto:t.kowaluk@mchtr.pw.edu.pl); prof. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk, Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, ul. Olszewska 12, 00-792 Warszawa, [erat@mchtr.pw.edu.pl](mailto:erat@mchtr.pw.edu.pl).