

Wzorce do badania dokładności przemysłowych tomografów komputerowych i przykłady ich zastosowania

Gauges for accuracy tests of industrial CT scanners and examples of their application

TOMASZ KOWALUK
EUGENIUSZ RATAJCZYK *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.4.156

Opisano metody sprawdzania dokładności pomiarów geometrycznych wykonywanych przemysłowymi tomografami komputerowymi, zgodnie z wytycznymi VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. „Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik”, oraz zaprezentowano wzorce do wyznaczania dokładności tych pomiarów. Przedstawiono przykładowe wyniki kalibracji tomografu METROTOM 800 firmy Carl Zeiss za pomocą wzorca przestrzennego z elementami kulistymi oraz wzorca w postaci cylindrycznego stożka stopniowego. Wyznaczono wartości błędu pomiaru długości E oraz wartości niektórych parametrów charakteryzujących własności wymiarowo-materiałowe: GS , GF i GG .

SŁOWA KLUCZOWE: przemysłowy tomograf komputerowy, wzorce do badania tomografów, błąd pomiaru długości, parametry wymiarowo-materiałowe

Described in the article are methods for verifying the accuracy of geometric measurements on industrial CT scanners according to the guidelines as indicated in VDI/VDE 2630 Blatt 1.3. „Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik”. Presented are gauges suggested for determination of accuracy of the geometric measurements. Sample results from calibration procedure to METROTOM CT 800 manufactured by C. Zeiss are provided. Used in this calibration were a 3D gauge with spherical elements and a gauge in the form of a stepped cylinder cone. The values of the following parameters were determined: length measurement error E , some of the parameters that characterize dimensional and material properties such as GS , GF and GG .

KEYWORDS: industrial computer tomograph, gauges for testing of industrial CT scanners, length measurement error, dimensional and material parameters

Przemysłowe tomografy komputerowe (CT) znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle i ośrodkach badawczych. Urządzenia te umożliwiają m.in.:

- wyznaczanie wymiarów przedmiotów (zarówno w odniesieniu do modelu CAD, jak i modeli wykorzystywanych w inżynierii odwrotnej),
- wykonywanie pomiarów wewnątrz zmontowanych obiektów (np. zmierzenie grubości wewnętrznych ścianek) [7, 8],
- wykrywanie wad materiałowych (badania defektoskopowe), wad montażu (nie tylko w obiektach mechanicznych, lecz także elektronicznych – możliwe jest np. wykrycie błędów w połączeniach ścieżek obwodów elektrycznych mikroprocesorów) itp.

Wiele ośrodków w Europie prowadzi prace nad metodami badania dokładności tomografów. Ponieważ przemysłowa tomografia komputerowa jest stosunkowo młodą dziedziną, nie zostały jeszcze opracowane dla niej normy ISO dotyczące sprawdzania dokładności. Obecnie tomografy mogą być sprawdzane według wytycznych VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. „Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik” [12].

* Mgr inż. Tomasz Kowaluk (t.kowaluk@mchtr.pw.edu.pl) – Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, prof. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk (erat33@interia.pl) – Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie

Idea pomiarów tomograficznych

Idea pomiarów tomograficznych polega na złożeniu trójwymiarowego obiektu przestrzennego z wielu obrazów płaskich, powstałych w wyniku prześwietlenia badanego elementu w zadanych położeniach kątowych. Mierzony element ustawiany jest na obrotowym stole, który umożliwia przemieszczanie oraz liniowe i kątowe pozycjonowanie elementu. Przedmiot mierzony jest oświetlany wiązką promieniowania rentgenowskiego generowanego przez lampę, natomiast detekcja obrazu odbywa się na matrycy detektora w określonych położeniach kątowych badanego przedmiotu. Otrzymane obrazy są przetwarzane za pomocą specjalistycznego oprogramowania, dzięki czemu uzyskuje się trójwymiarowy model mierzonego elementu [1, 4, 5, 8].

Podczas pomiaru mierzone przedmioty pochłaniają energię promieniowania rentgenowskiego, dlatego wiązka rentgenowska zostaje osłabiona. Różnica intensywności promieniowania przed przejściem i po przejściu przez obiekt jest rejestrowana przez detektor. Zmianę natężenia promieniowania równoległej wiązki o jednakowej energii po przejściu przez obiekt opisuje zależność [7, 8]:

$$I = I_0 e^{-\mu g} \quad (1)$$

gdzie: I – natężenie promieniowania po przejściu przez obiekt, I_0 – początkowe natężenie promieniowania, μ – liniowy współczynnik absorpcji promieniowania, g – grubość badanego materiału.

Współczynnik liniowy absorpcji promieniowania jest związany z gęstością i budową atomową materiału, z którego wykonano mierzony przedmiot [9+11].

Tomograf METROTOM 800

Badania dokładności przeprowadzono na przykładzie przemysłowego tomografu komputerowego METROTOM 800 firmy Carl Zeiss (rys. 1), znajdującego się w laboratorium Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Tomograf ten jest wyposażony w:

- źródło promieniowania rentgenowskiego – lampę rentgenowską o maksymalnej mocy 39 W (parametry zasilania są następujące: napięcie 130 kV, natężenie 300 μ A) i o minimalnym rozmiarze ogniskowej 5 μ m,
- matrycę detektorów promieniowania o rozdzielczości 1536 \times 1920 pikseli (rozmiar pojedynczego piksela: 127 \times 127 μ m),
- układ do pozycjonowania mierzonego elementu, składający się z obrotowego stołu pomiarowego oraz prowadnic liniowych umożliwiających przemieszczanie przedmiotu w kierunkach X , Y i Z [3].

Graniczny dopuszczalny błąd wskazania MPE_E w przypadku pomiarów geometrycznych dla tomografu METROTOM 800 wynosi $(4,5 + L/100)$ μ m (gdzie L jest mierzonym wymiarem w mm). Maksymalne powiększenie dla pomiarów 2D



Rys. 1. Widok tomografu komputerowego METROTOM 800 firmy Carl Zeiss

wynosi 45×, a dla pomiarów 3D – 40×. Układ pozycjonowania pozwala na przemieszczanie mierzonego obiektu w zakresie do 700 mm dla osi X oraz do 270 mm dla osi Z.

Stół pomiarowy charakteryzuje się powtarzalnością pozycji kątowej 0,5" oraz maksymalnym biciem promieniowym i osiowym 0,2 μm [3].

W badaniach wykorzystano oprogramowanie:

- CALYPSO – do pomiarów geometrycznych,
- VGStudio MAX – do defektoskopii,
- Dimension – do inżynierii odwrotnej.

Parametry charakteryzujące dokładność tomografu

Według wytycznych VDI/VDE 2630 [11] do określania dokładności tomografów komputerowych służą następujące parametry i grupy parametrów:

- parametr związany z błędem pomiaru długości – *E*,
- parametry związane z błędem skanowania – *PF*, *PS*,
- parametry określające zależności wymiarowo-materiałowe – *GS*, *GF*, *GG*,
- parametr określający rozdzielczość – *Dg*.

Parametry z trzech pierwszych grup są wyznaczane dla dwóch układów projekcji:

- 2D (dla płaskiej wiązki promieniowania) – do parametru dodaje się wówczas oznaczenie *TS* (np. *PF(TS)* – tzw. pomiar w obrazie),
- 3D (dla stożkowej wiązki promieniowania) – do parametru dodaje się oznaczenie *TT* (np. *PF(TT)* – tzw. pomiar na obrazie).

Tak jak w technice pomiarów współrzędnościowych, według PN EN ISO 10360 [6], błąd pomiaru długości *E* wyznacza się za pomocą materialnych wzorców długości, a wyznaczoną wartość porównuje się z granicznym dopuszczalnym błędem pomiaru długości: $MPE_E = \pm(A + L/K) \mu\text{m}$.

Wzorcami długości mogą być: płytki wzorcowe, wzorce kulowe, stopniowe wzorce walcowe, wzorce o specjalnej konstrukcji (np. zestawy trzpieni pomiarowych zakończonych elementami kulistymi) itd. W przypadku zastosowania płytki wzorcowej wiązka promieniowania rentgenowskiego przechodzi przez całą długość płytki – uzyskuje się pomiar odległości między jej dwoma przeciwległymi powierzchniami, a błąd pomiaru wynosi wtedy:

$$E = L_a - L_r \quad (2)$$

gdzie: L_a – długość płytki wyznaczona na podstawie pomiaru, L_r – wzorcowa długość płytki.

Ze względu na fakt, że wiązka promieniowania przechodzi przez całą długość płytki, a także z uwagi na ograniczoną przenikalność stali stosuje się płytki wzorcowe o małej długości – najczęściej nieprzekraczającej 30 mm.

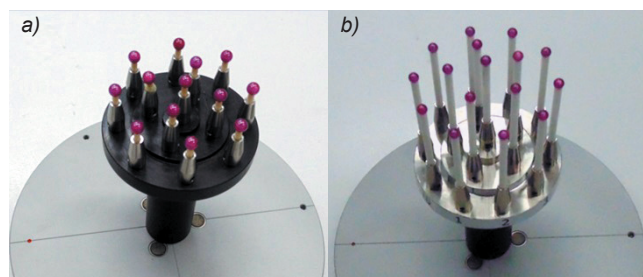
Ograniczenia związane z przenikalnością w zasadzie nie występują w przypadku wzorców z elementami o małych rozmiarach – np. z elementami kulistymi rozstawionymi w określonych odległościach – gdy istota pomiaru sprowadza się do wyznaczenia odległości między nimi i porównania z odległościami wzorcowymi.

W badaniach dokładności tomografu METROTOM 800 skoncentrowano się na parametrze związanym z pomiarem długości *E* oraz na parametrach określających własności wymiarowo-materiałowe: *GS*, *GF*, *GG*.

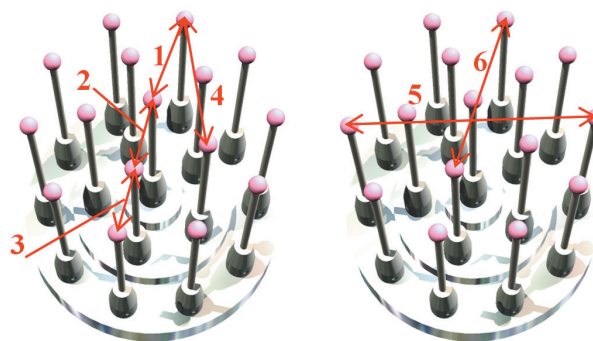
Rodzaje wzorców zastosowanych w badaniach

Do wyznaczenia błędów pomiaru długości *E* opracowano wzorce z elementami kulistymi (rys. 2).

Wymiary wzorców są reprezentowane przez odległości między środkami poszczególnych elementów kulistych. Podczas kalibracji wzorca wyznaczone są współrzędne punktów środkowych wszystkich kul. Wzorec zawierający 13 elementów kulistych (rys. 2a) umożliwia wyznaczenie 78, a wzorec 16-elementowy (rys. 2b) – 120 odległości wzorcowych. Odległości między środkami elementów kulistych można zgrupować w serie odległości wzorcowych. Dla wzorca z 16 elementami kulistymi odległości wzorcowe zostały przypisane do sześciu grup (rys. 3).

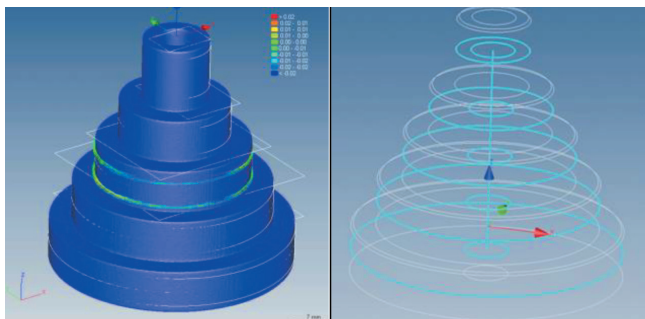


Rys. 2. Wzorce długości z elementami kulistymi: a) 13-elementowy, b) 16-elementowy



Rys. 3. Wykaz wzorcowych grup wymiarów odległości między 16 elementami kulistymi

Do oceny zależności materiałowo-geometrycznych GS , GG i GF stosuje się wzorce w postaci stopniowych walców, mających charakter stożków cylindrycznych (rys. 4).



Rys. 4. Przykład wzorca w postaci stożka cylindrycznego

Parametr GS wyraża się wzorem:

$$GS = D_a - D_r \quad (3)$$

gdzie: D_a – zmierzona średnica, D_r – średnica wzorcowa.

Pozostałe parametry określają:

- GG – prostoliniowość otworu,
- GF (dotyczący mierzonego łuku) – rozpiętość promieniowej odchyłki od dopasowanego kształtu.

Badania związane z wyznaczeniem błędu pomiaru długości E

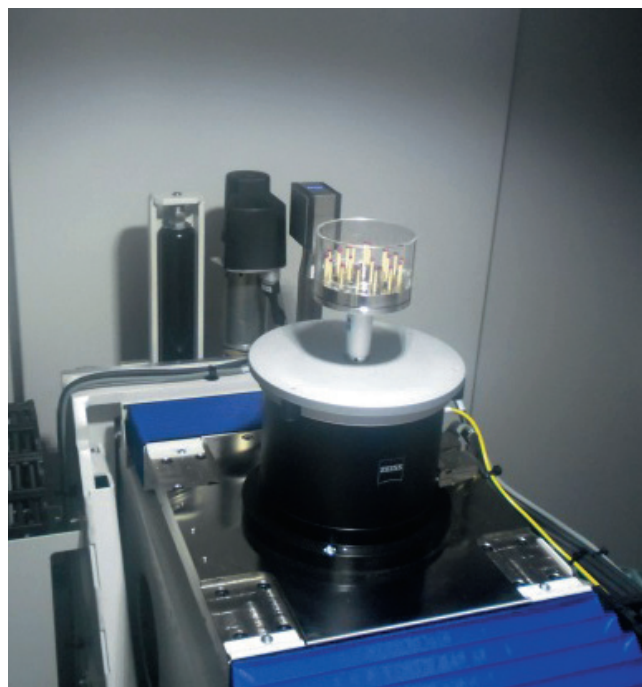
Do wyznaczenia wartości błędu E zastosowano wzorec METROTOM Check Micro, składający się z 22 trzpieni zakończonych kulistymi elementami rubinowymi, rozmieszczonymi na trzech wysokościach zgrupowanych w serie pięciu wzorcowych odległości. Na rys. 5 przedstawiono wzorec ustawiony na stoliku tomografu METROTOM 800.

Pomiary przeprowadzono przy powiększeniu $2,86\times$ (określonym przez producenta) i odległości od lampy rentgenowskiej w osi X wynoszącej 270 mm. Powiększenie dobierano tak, aby wykorzystać cały zakres pracy detektora. Pomiar wykonywano trzykrotnie dla tych samych ustawień. Protokół wzorcowania zawierał następujące informacje dotyczące parametrów pomiarowych:

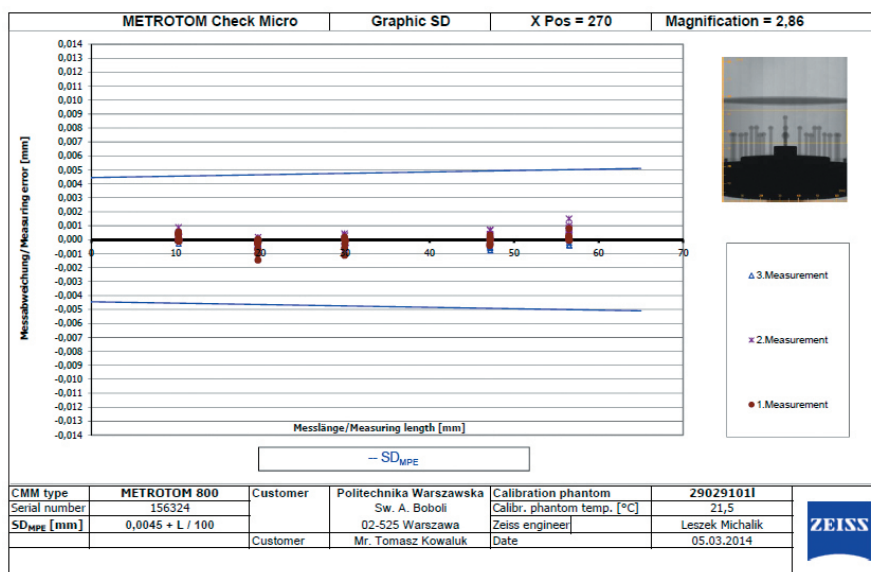
- napięcie i natężenie prądu lampy rentgenowskiej,
- wzmocnienie i czas integracji detektora,
- powiększenie,
- pozycję osi,
- liczbę projekcji,
- typ stosowanych filtrów oraz informacje o włączonych opcjach (np. funkcji sprawdzania ogniskowej lampy rentgenowskiej).

Wyniki wszystkich pomiarów zaprezentowano w formie tabeli oraz wykresu ilustrującego odchyłki (rys. 6).

Na wykresie znajdują się dwie linie biegnące pod kątem, określające granice błędu dopuszczalnego badanego tomografu (zgodnie ze wzorem $MPE_E = (4,5 + L/100) \mu\text{m}$, gdzie L wyznacza najdłuższą odległość między osiami końcówek kulistych wzorca, podaną w mm). Jak widać, wszystkie serie badanych odległości mieszczą się w granicach błędu dopuszczalnego i są skupione wokół linii zerowej (nie przekraczają $1,8 \mu\text{m}$). W ten sposób została potwierdzona dokładność tomografu w zakresie wyznaczania wymiarów.



Rys. 5. Widok wzorca METROTOM Check Micro podczas pomiarów na tomografie METROTOM 800

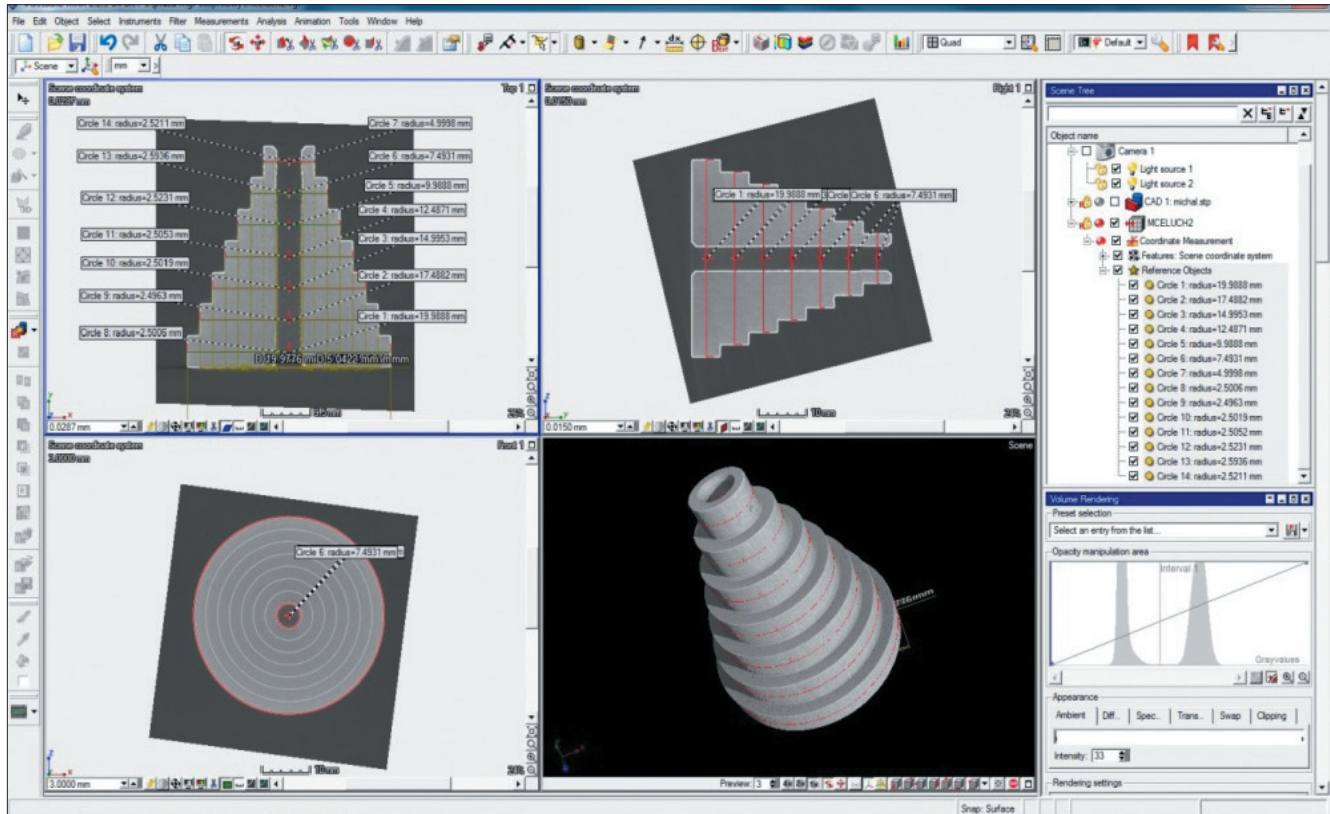


Rys. 6. Wykres błędów pomiaru długości E tomografu METROTOM 800

Badania związane z wyznaczeniem wartości parametrów wymiarowo-materiałowych GS , GF , GG

Do badań zastosowano wzorec w postaci aluminiowego stopniowego stożka cylindrycznego, opracowanego w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej (rys. 7). Wzorec ten ma siedem stopni wymiarowych – od średnicy największej, równej 40 mm, do najmniejszej – wynoszącej 10 mm (stopniowanie co 5 mm). W środku stożka wykonano otwór przelotowy o średnicy 5 mm. Atestacja stożka odbyła się na maszynie pomiarowej ALTERA 10.7.6 (firmy Nikon Metrology) charakteryzującej się granicznym błędem dopuszczalnym w pomiarach punktowych wynoszącym $MPE_E = (1,8 + L/400) \mu\text{m}$. Pomiary przeprowadzono w sposób opisany w [2].

Za pomocą tomografu mierzono dla danego przekroju średnicę zewnętrzną (d) i wewnętrzną (D). Każdy pomiar powtarzano dziesięć razy, co pozwoliło na wyznaczenie takich parametrów charakteryzujących dokładność, jak odchylenie standardowe i rozstęp. Wyniki zawierające średnie z dziesięciu pomiarów zamieszczono w tabl. I.



Rys. 7. Widok ekranu z wynikami pomiaru na modelu CAD wszystkich średnic zmierzonych w połowie każdego stopnia wymiarowego

W przypadku średnic zewnętrznych wartości odchylenia standardowego, pomnożonego przez współczynnik t-studenta, wahają się od $0,5 \mu\text{m}$ (dla średnicy d_6) do $1,8 \mu\text{m}$ (dla średnicy d_1), natomiast rozstęp – od $0,7 \mu\text{m}$ (dla średnic d_6 i d_7) do $2 \mu\text{m}$ (dla średnic d_1 i d_2). Z kolei dla średnic wewnętrznych wartości odchylenia standardowego, pomnożonego przez współczynnik t-studenta, wynoszą od $1,1 \mu\text{m}$ (dla średnicy D_{10}) do $3,1 \mu\text{m}$ (dla średnicy D_{14}), a rozstęp – od $1,6 \mu\text{m}$ (dla średnicy D_{10}) do $4,5 \mu\text{m}$ (dla średnicy D_{14}).

Wyniki uzyskano w programie CALYPSO (uwzględniają one korektę związaną z temperaturą).

Wartości zebrane w tabl. I były podstawą do wyznaczenia – zgodnie z równaniem (3) – parametru **GS** (tabl. II).

Wartości **GS** dla średnic zewnętrznych wzorca mieszczą się w przedziale od $-11,1 \mu\text{m}$ (dla średnicy d_1) do $-22 \mu\text{m}$ (dla średnicy d_5), a średnicy wewnętrznej od $-0,9 \mu\text{m}$ (dla średnicy D_{11}) do ponad $0,1 \text{ mm}$ (dla średnicy D_{14}), co wynika z uszkodzenia wewnętrznego otworu przelotowego (powstania głębokich rys po obróbce).

Niepewność pomiaru parametru **GS** można obliczyć ze wzoru:

$$u_c(\text{GS}) = 2 \sqrt{\left(\frac{\partial \text{GS}}{\partial D_a}\right)^2 \cdot u_{D_a}^2 + \left(\frac{\partial \text{GS}}{\partial D_r}\right)^2 \cdot u_{D_r}^2} = 2 \sqrt{1^2 \cdot u_{D_a}^2 + (-1)^2 \cdot u_{D_r}^2} \quad (4)$$

gdzie: D_r – wartość średnia średnicy wzorcowej (zmierzonej na maszynie współrzędnościowej), u_{D_r} – niepewność pomiaru parametru D_r , D_a – wartość średnia średnicy zmierzonej za pomocą tomografu METROTOM 800, u_{D_a} – niepewność pomiaru parametru D_a .

Obliczone wartości niepewności rozszerzonej $u_c(\text{GS})$ pomiaru parametru **GS** przedstawiono w tabl. III.

Wartość niepewności rozszerzonej wyznaczenia średnicy zewnętrznej charakteryzuje się względnie dostateczną stabilnością i mieści się w przedziale $1,63 \pm 6,7 \mu\text{m}$.

W celu wyznaczenia parametru **GG** jako odchyłkę prostoliniowości osi otworu wzorca przyjęto podwójną maksymalną odległość i -tego punktu od aproksymowanej prostej (D_i), czyli osi otworu:

$$\text{GG} = 2 \cdot \max(D_i) \quad (5)$$

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=8}^{i=14} \left(\frac{((x_i - x_{sr}) \cdot Y - (y_i - y_{sr}) \cdot X)^2 + ((y_i - y_{sr}) \cdot Z - (z_i - z_{sr}) \cdot Y)^2 + ((z_i - z_{sr}) \cdot X - (x_i - x_{sr}) \cdot Z)^2}{X^2 + Y^2 + Z^2} \right)^2} \quad (6)$$

gdzie: x_i, y_i, z_i – współrzędne i -tego punktu; x_{sr}, y_{sr}, z_{sr} – współrzędne średnie ze wszystkich punktów; X, Y, Z – współczynniki kierunkowe prostej.

Obliczone odległości środków okręgów wewnętrznych od osi otworu podano w tabl. IV.

Maksymalna wartość D_i przypada dla średnicy D_9 i wynosi $0,02833 \text{ mm}$, stąd wartość parametru **GG** jest równa **$0,057 \text{ mm}$** .

Niepewność pomiaru parametru **GG** opisuje równanie:

$$u_c(\text{GG}) = 2 \left[\left(\frac{\partial \text{GG}}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u_{x_i}^2 + \left(\frac{\partial \text{GG}}{\partial y_i}\right)^2 \cdot u_{y_i}^2 + \left(\frac{\partial \text{GG}}{\partial z_i}\right)^2 \cdot u_{z_i}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

gdzie: $u_{x_i}, u_{y_i}, u_{z_i}$ – odpowiednio niepewność pomiaru wielkości x_i, y_i oraz z_i .

Wartości parametru **GF**, określającego rozpiętość mierzonego łuku, wyznaczono na podstawie odchyłek okrągłości w każdym przekroju wzorca – zarówno dla okręgów

zewewnętrznych, jak i wewnętrznych. Wyniki pomiarów wykonanych na tomografie METROTOM 800 i uzyskane w programie VGStudio MAX 2.2 przedstawiono w postaci zbiorczej – jako wartości wyznaczone ze średnich z każdej serii dziesięciu pomiarów (tabl. V).

Wartości średnie odchyłek okrągłości średnic zewnętrznych są stosunkowo duże i zbliżone do siebie – dla poszczególnych okręgów mieszczą się w przedziale $25,6 \div 30 \mu\text{m}$. Ich odchylenia średniokwadratowe wynoszą $1,71 \div 3,18 \mu\text{m}$. Podobne wartości odchyłek średniokwadratowych uzyskano dla średnic otworów – $1,63 \div 3,58 \mu\text{m}$, lecz wartości średnie odchyłek okrągłości otworów wzorca były dwu-, a nawet trzykrotnie większe – $37,3 \div 91,2 \mu\text{m}$.

Jak te wartości odnoszą się do wymiarów wzorcowych określonych w pomiarach na maszynie współrzędnościowej ALTERA? Otóż średnie wartości odchyłek okręgów zewnętrznych mieszczą się w przedziale $3,5 \div 10,3 \mu\text{m}$, a więc

są ponad trzykrotnie mniejsze. W przypadku okręgów wewnętrznych odchyłki okrągłości osiągają wartości z przedziału $9,3 \mu\text{m}$ (dla okręgu 11) do $221 \mu\text{m}$ (dla okręgu 14). To świadczy o stosunkowo małej dokładności wykonania otworu – potwierdzają to również wyznaczone wcześniej wartości odchyłki GS (tabl. II).

Zgodnie z wytycznymi normy VDI/VDE 2630 pomiar geometrycznych odchyłek wymiaru i kształtu należy wykonać dla dwóch położenia katowych, z tym że różnica między nimi musi wynosić minimum 30° względem osi obrotu stołu pomiarowego. Wszystkie opisane w artykule pomiary dotyczą ustawienia wzorca pod kątem 10° , dlatego przeprowadzono dodatkową serię pomiarów dla ustawienia wzorca pod kątem 45° . Z uwagi na ich stosunkowo dużą pracochłonność wykonano tylko trzy pomiary i kolejno wyznaczono parametry GS, GF i GG. Różnice pomiędzy wynikami dla dwóch ustawień katowych nie przekraczały $5 \mu\text{m}$.

TABLICA I. Wyniki pomiarów średnic elementu wzorcowego na tomografie METROTOM 800

| Średnice zewnętrzne | d1 | d2 | d3 | d4 | d5 | d6 | d7 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Średnia, mm | 39,9736 | 34,9729 | 29,9877 | 24,9720 | 19,9759 | 14,9848 | 9,9988 |
| Odchylenie standardowe, mm | 0,0008 | 0,00069 | 0,0005 | 0,00042 | 0,0003 | 0,00022 | 0,00026 |
| Rozstęp, mm | 0,0020 | 0,0020 | 0,0015 | 0,0011 | 0,0010 | 0,0007 | 0,0007 |
| Średnice wewnętrzne | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| Średnia, mm | 5,0416 | 5,1868 | 5,0455 | 5,0097 | 5,0025 | 4,9916 | 5,0017 |
| Odchylenie standardowe, mm | 0,00058 | 0,00076 | 0,00049 | 0,0007 | 0,00119 | 0,00081 | 0,00137 |
| Rozstęp, mm | 0,002 | 0,0029 | 0,0016 | 0,0021 | 0,0038 | 0,0023 | 0,0045 |

TABLICA II. Wyniki pomiaru parametru GS

| Średnice zewnętrzne | d1 | d2 | d3 | d4 | d5 | d6 | d7 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| GS, mm | -0,0111 | -0,0115 | -0,0137 | -0,0172 | -0,0220 | -0,0120 | -0,0133 |
| Średnice wewnętrzne | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| GS, mm | 0,0106 | 0,0300 | 0,0055 | -0,0009 | 0,0012 | 0,0027 | 0,1004 |

TABLICA III. Wartości niepewności rozszerzonej wyznaczenia parametru GS

| Średnice zewnętrzne | d1 | d2 | d3 | d4 | d5 | d6 | d7 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $u_c(GS)$, mm | 0,00674 | 0,00606 | 0,00452 | 0,00634 | 0,00360 | 0,00214 | 0,00163 |
| Średnice wewnętrzne | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| $u_c(GS)$, mm | 0,00283 | 0,00790 | 0,00582 | 0,00684 | 0,00890 | 0,00551 | 0,01398 |

TABLICA IV. Wartości odległości środków okręgów

| Średnice wewnętrzne | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| D_p , mm | 0,02753 | 0,02833 | 0,02724 | 0,01346 | 0,02071 | 0,01764 | 0,02804 |

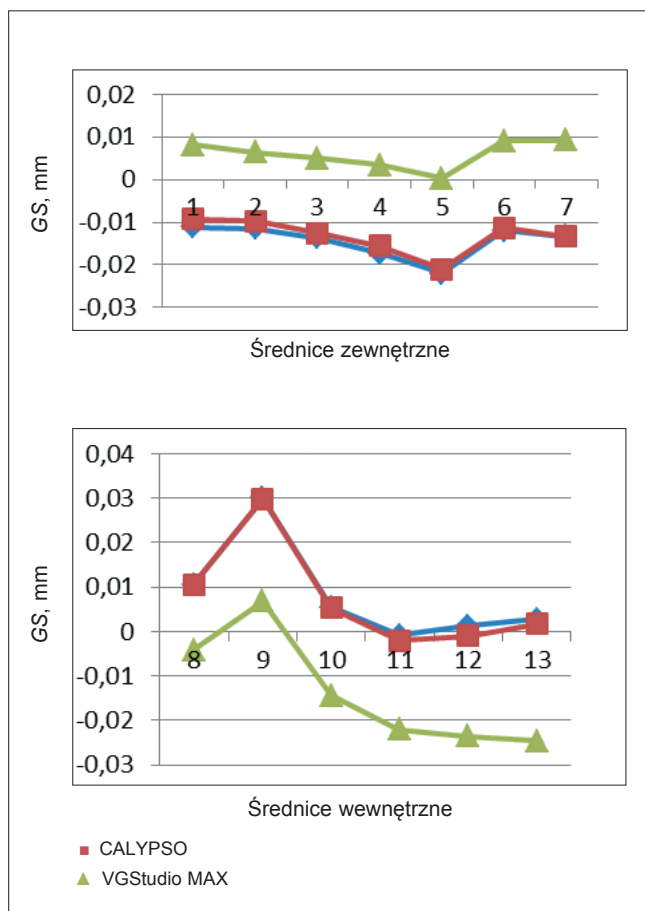
TABLICA V. Wyniki pomiarów odchyłek okrągłości wzorca na tomografie METROTOM 800

| Średnice zewnętrzne | d1 | d2 | d3 | d4 | d5 | d6 | d7 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Średnia, mm | 0,02890 | 0,02560 | 0,02660 | 0,02730 | 0,02570 | 0,03000 | 0,02560 |
| Odchylenie standardowe, mm | 0,00318 | 0,00204 | 0,00313 | 0,00171 | 0,00252 | 0,00211 | 0,00240 |
| Rozstęp, mm | 0,01040 | 0,00550 | 0,01100 | 0,00530 | 0,00810 | 0,00750 | 0,00700 |
| Średnice wewnętrzne | D8 | D9 | D10 | D11 | D12 | D13 | D14 |
| Średnia, mm | 0,09120 | 0,06600 | 0,06080 | 0,04070 | 0,03730 | 0,04390 | 0,04100 |
| Odchylenie standardowe, mm | 0,03583 | 0,00770 | 0,00559 | 0,00488 | 0,00371 | 0,00163 | 0,00187 |
| Rozstęp, mm | 0,10940 | 0,02110 | 0,02070 | 0,01480 | 0,01300 | 0,00540 | 0,00630 |

Podsumowanie

- W przypadku wyznaczania wartości parametru E , związanego z błędem pomiaru długości, dobre rezultaty dają wzorce o małych wymiarach – dotyczy to zwłaszcza tomografów z lampami o napięciu do 225 kV. Takie wzorce są zbudowane z zestawu elementów kulistych rozstawionych w określonej odległości. Mogą to być wzorce prętowe z elementami kulistymi, których przykłady pokazano na rys. 2 i 5. Wymiary wzorców długości są wtedy określone przez odległości między osiami elementów kulistych. Atestacja takich wzorców stanowi trudność w sytuacji ich wzorcowania na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (a tak to się zazwyczaj odbywa) – ze względu na nacisk pomiarowy końcówki wywierany na atestowane elementy kuliste oraz z uwagi na ugięcia trzpieni. Dobre efekty przynosi również zastosowanie głowic pomiarowych z przetwornikiem wyposażonym w generator siły, który redukuje wpływ ugięcia trzpieni.
- Badania dokładności wyznaczania parametrów GS , GF i GG , przeprowadzone za pomocą wzorca stożkowego ze stopniowanymi średnicami zewnętrznymi (rys. 7), wykazały niewystarczającą dokładność wykonania otworu, co miało również wpływ na małą dokładność wyznaczenia tych parametrów. W celu lepszego zbadania zależności materiałowo-geometrycznych należałoby wykonać i skalibrować nowy wzorec.
- Badania ujawniły występowanie różnic w wynikach pomiaru wzorca w zależności od rodzaju zastosowanego oprogramowania i badanego wymiaru. Dobrze to ilustruje rys. 8, na którym widać wyraźne różnice w wartościach parametru GS wyznaczanych dla średnic zewnętrznych i średnic wewnętrznych. W przypadku programu CALYPSO dla wymiarów zewnętrznych otrzymano mniejsze wartości, a dla wymiarów wewnętrznych większe wartości w porównaniu z wartościami uzyskanymi w oprogramowaniu VGStudio MAX. Te różnice wynikały przede wszystkim z przyjętej w obu programach różnej

wartości granicznej pomiędzy materiałem a powietrzem. Na podstawie tej wartości wykonywane są wszystkie pomiary liniowe. Jej zmiana skutkuje zmianą uzyskiwanych wyników pomiarów liniowych w efekcie ich przeskalowania (widać to na rys. 8). Wyniki uzyskane w obu programach mają zatem podobny charakter, lecz są względem siebie przesunięte o offset związany z innym określeniem granicy materiał–powietrze.



Rys. 8. Wykresy wartości parametru GS dla wymiarów zewnętrznych i wewnętrznych wzorca w postaci stożka stopniowego, uzyskane w programach

• Badania wykazały wpływ zależności materiałowo-geometrycznych na wyniki pomiaru średnic opisywanych przez parametr GS. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że im większa grubość materiału, tym odchylenie wartości średnicy od średnicy wzorcowej jest większe. Jest to związane z obliczaną przez programy pomiarowe wartością granicy materiał–powietrze. Część wokseli, która powinna być traktowana jako powietrze, w rzeczywistości jest traktowana jako materiał. Dlatego też wartości średnic zewnętrznych są większe, a średnic wewnętrznych – mniejsze w porównaniu z wartościami uzyskanymi w pomiarach wzorca na współrzędnościowej maszynie pomiarowej.

LITERATURA

- Gapiński B., Wieczorowski M., Marciniak-Podsada L., Dybała B., Ziółkowski 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.
- Celuch M. „Ocena wpływu zależności materiałowo-geometrycznych dla pomiarów na przemysłowym tomografie komputerowym METROTOM 800 zgodnie z wytycznymi VDI/VDE 2630”. Praca dyplomowa magisterska. Warszawa 2015.

- Kowaluk T., Woźniak A. "Study of computer tomography resolution using image quality indicators". Eds. Woźniak A. et al. *Accuracy in coordinate metrology*, X-th International Scientific Conference Coordinate Measuring Technique, Bielsko-Biała, Poland, April 2012. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, 2012: pp. 96+103.
- Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., De Chiffre L., Weckenmann A. "Computed tomography for dimensional metrology". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 60 (2011): pp. 821+842.
- Müller P., Hiller J., Cantatore A., Tosello G., De Chiffre L. „New reference object for metrological performance testing of industrial CT systems”. Kgs. Lyngby (Denmark): Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark (DTU), 2012.
- Ratajczyk E. „Współrzędnościowa technika pomiarowa”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- Ratajczyk E. „Tomografia przemysłowa CT – rodzaje, parametry, zastosowania”. *Pomiary Automatyka Kontrola (PAK)*. Vol. 60, nr 9 (2014): s. 713+717.
- 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.
- Ryniewicz A. "Accuracy assessment of shape mapping using Computer Tomography". *Metrology and Measuring Systems. Quarterly of Polish Academy of Sciences*. Vol. XVII, No. 3 (2010): pp. 482+491.
- Wieczorowski M., Gapiński B. "X-ray CT in metrology of geometric feature". *ACTA Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*. T. VII (2014): pp. 95+100.
- Weckenmann A. "Micro measurements using CT". *Symposium on Computed Tomography applied to Dimensional Control*. Berlin (Niemcy), 2009.
- VDI/VDE 2630. Blatt 1.3. Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik, Düsseldorf 2009. ■