

Metody sprawdzania dokładności przemysłowych tomografów komputerowych

Methods of accuracy verification of industrial CT scanners

EUGENIUSZ RATAJCZYK
TOMASZ KOWALUK *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.478

Podano przykładową budowę przemysłowego tomografu komputerowego i wymieniono jego funkcje. Następnie scharakteryzowano wytyczne VDI/VDE i projektu normy ISO dotyczące testów dokładności tomografów.

SŁOWA KLUCZOWE: Przemysłowy tomograf komputerowy, główne funkcje tomografu przemysłowego, testy dokładności

A sample construction of a CT scanner with functions of main units were described. Then VDI/VDE guidelines and draft of ISO standard concerning accuracy tests of CT scanners were characterized.

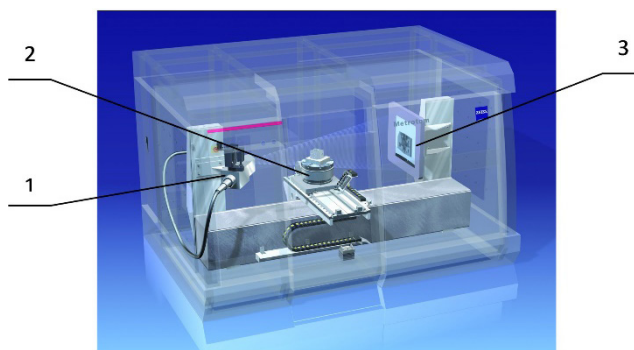
KEYWORDS: Keywords: industrial CT scanners, main functions of an industrial CT scanner, accuracy tests

Komputerowe tomografy przemysłowe (CT) stanowią obecnie nową grupę aparatury pomiarowej i badawczej, przewyższającą w wielu przypadkach dotychczasowe urządzenia pomiarowe swoim wszechstronnym obszarem zastosowań. Bowiem tomografy te pozwalają na wykonywanie następujących zadań badawczych i pomiarowych:

- Wykonywanie pomiarów elementów w ujęciu trójwymiarowym tworzonym z dużej liczby punktów, tj. z tzw. chmury punktów, uzyskując model CAD mierzonego elementu, który to model może stanowić podstawy do jego wykonania, a nawet wydrukowanie go na drukarce 3D.
- Wykonywanie pomiaru elementu maszynowego istniejącego w postaci modelu CAD z uzyskaniem trójwymiarowego jego widoku z naniesionymi obszarami odchyłek od wymiaru nominalnego w porównaniu z odchyłkami dopuszczalnymi.
- Możliwość wykonywania pomiarów wewnętrznych powierzchni przedmiotu niewidocznych z zewnątrz, np. ścianek wewnętrznych korpusu silnika samochodowego i oceny drożności kanałów chłodzących.
- Możliwość oceny jakości montażu bez jego demontażu, zarówno elementów maszynowych, jak i zespołów elektronicznych. Czynności te są szczególnie ważne w rocesie oceny jakości produkcji. Na przykład do oceny jakości montażu zespołu elektronicznego w celu wykrycia anomalii połączeń poszczególnych ścieżek, wykrycia nadmiaru lutu itp.
- Badania elementów zarówno metalowych, jak i z tworzyw sztucznych w zakresie defektoskopii w celu wykrycia niejednorodności materiału, wtrąceń innych pierwiastków, zanieczyszczeń, pęcherzy, pęknięć, rozwarstwień itp. [1–4] oraz oceny ich wymiarów.

Przykładowa budowa tomografu

Do głównych zespołów tomografu zalicza się lampę rentgenowską 1 (rys. 1) i jej układ wspomagający, jak zasilacz, układ chłodzący itp.; układ mocowania i pozycjonowania przedmiotu, zwykle składający się z obrotowego stołu pomiarowego i prowadnicy liniowej 2 oraz systemu detektorów 3, często w postaci matrycy (panelu). W skład tomografu wchodzi również zestaw komputerowy niepokazany na rys. 1. Na uwagę zasługuje obudowa zabezpieczająca operatora przed promieniowaniem rentgenowskim. W przypadku tomografu METROTOM firmy Carl Zeiss, pokazanego na rys.1, promieniowanie X nie przekracza dawki 1 $\mu\text{Sv/h}$ w odległości 0,05 m od obudowy.



Rys. 1. Główne zespoły CT na przykładzie tomografu METROTOM firmy Carl Zeiss

Parametry charakteryzujące dokładność

Dotychczas sprawdzanie dokładności tomografów komputerowych odbywało się według wytycznych VDI/VDE 2630 [5]. Ostatnio pojawiły się nowe wytyczne oparte na projekcie normy ISO CT 10360-11 [6]. W wielkim skrócie scharakteryzowane zostaną jedno i drugie metody testowania dokładności tomografów.

Według wytycznych VDI/VDE dokładność przemysłowych tomografów komputerowych charakteryzują następujące cztery 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 wyznaczane są dla dwóch układów tomografów:

- dla 2D – płaskiej wiązki promieniowania – do parametru dodaje się TS np. $PF(TS)$, pomiar określany jest jako „w obrazie”,
- dla 3D – stożkowej wiązki promieniowania – do parametru dodaje się TT , np. $PF(TT)$, pomiar określany jest jako „na obrazie”.

* Prof. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk (erat33@interia.pl) – Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie; mgr inż. Tomasz Kowaluk (tomek.kowaluk@gmail.com) – Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

Parametry te zostały dokładniej opisane, podobnie jak i metody wyznaczania ich wartości, we wcześniejszych publikacjach z przykładami odpowiednich wzorców [7, 8]. Własności tomografów – ich funkcje i zagadnienia dokładności zawarto w szeregu dalszych publikacji (9–14). W tej publikacji więcej uwagi poświęcone zostanie wymaganiom, jakie zawarte są w projekcie normy ISO [6].

Projekt normy definiuje specyfikacje i metody testowania współrzędnościowych systemów pomiarowych (CMS) stosujących zasadę tomografii komputerowej w celu porównywalności cech współrzędnościowych systemów pomiarowych z sensorami stykowymi i optycznymi. W ścisłej zależności od ISO 10360-2:2010 i ISO 10360-5:2003 jak również ISO 10360-8:2014 projektowana norma definiuje metody badań odbiorczych mających na celu monitorowanie błędów pomiaru długości i błędów próbkowania. Jednak nie odnosi się do badań materiałowych i celów medycznych.

Stosowane symbole i oznaczenia składają się z dużej litery opisującej albo charakterystykę błędu próbkowania P , albo charakterystykę błędu pomiaru długości E . Dalsze parametry opisujące wielkość mierzone występują w trzech grupach indeksów i są oddzielone dwukropkami. Natomiast w każdej grupie wpisy są oddzielone pojedynczymi kropkami. Na przykład $PForm.Sph.1x25:Tr:CT$ lub $EBi:Tr:CT$. Dodany indeks MPE (po przecinku) oznacza specyfikacje największego (maksymalnego) dopuszczalnego błędu, jak to ilustruje następujący przykład: $Form.Sph.1x25: Tr:CT, MPE$ lub $EBi:Tr:CT, MPE$.

Proponowane są dwa tryby pomiaru: tryb stacjonarny tzw. pomiaru „w obrazie” (St) i tryb postępowy pomiaru „na obrazie” (Tr). Tryb „na obrazie” występuje, gdy generowanie pliku objętościowego pomiaru (szumy, niestabilność pracy itp.) CT nie wymaga rejestracji i łączenia (często nazywanego szciem) kilku cząstkowych obrazów radiograficznych na projekcję obrazów.

Ocena dokładności systemu komputerowego obejmuje wyznaczanie błędów próbkowania i błędów pomiaru długości.

Błędy próbkowania obejmują następujące ich rodzaje:

- **Błąd próbkowania kształtu** $PForm.Sph.1x25::CT$, w ramach którego zakres odległości promieniowej Gaussa może być określony przez dopasowanie najmniejszej sumy kwadratów 25 punktów reprezentatywnych z kuli testowej. Punkty powinny być w przybliżeniu równomiernie rozłożone na powierzchni kuli, najlepiej wg wytycznych zwartych w ISO 10360-5:2003. Wyznaczona wartość błędu powinna się zawierać w maksymalnym błędzie dopuszczalnym kształtu $PForm.Sph.1x25::CT, MPE$ dozwolonym przez specyfikacje.

- **Wartość rozproszenia próbkowania** $PForm.Sph.D95%::CT$ – najmniejsza szerokość sferycznej powłoki, która zawiera 95% wszystkich punktów pomiarowych.

- **Błąd próbkowania wymiaru** $PSize.Sph.1x25::CT$ błąd wskazania (błąd średnicy) – różnica pomiędzy średnicą dopasowania najmniejszej sumy kwadratów do 25 punktów reprezentatywnych z kuli testowej a kalibrowaną wartością tej średnicy.

Te same 25 punktów reprezentatywnych, które zostały użyte do testu błędu próbkowania kształtu $PForm.Sph.1x25::CT$, stosuje się do oceny błędu próbkowania wymiaru. Po obliczeniu kuli Gaussa, używając 25 punktów reprezentatywnych, wyznacza się średnicę tej kuli. Błąd próbkowania wymiaru określany jest z różnicy pomiędzy wyznaczoną średnicą kuli Gaussa a kalibrowaną średnicą kuli testowej.

- **Błąd próbkowania wymiaru All** $PSize.Sph.All::CT$ błąd wskazania (błąd średnicy) – różnica pomiędzy średnicą dopasowania najmniejszej sumy kwadratów do wszystkich punktów pomiarowych z kuli testowej a kalibrowaną wartością tej średnicy.

Ten sam pomiar i wszystkie punkty pomiarowe, które zostały użyte jako surowe dane wejściowe do testu błędu próbkowania ($PForm.Sph.1x25::CT$ i $PForm.Sph.D95$), stosuje się do oceny wartości błędu próbkowania wymiaru All. Błąd próbkowania wymiaru All wyznacza się z różnicy pomiędzy wyznaczoną średnicą kuli Gaussa a kalibrowaną średnicą kuli testowej.

- **Błąd pomiaru długości** $EBi::CT$ błąd wskazania (błąd pomiaru długości) podczas dwukierunkowego pomiaru kalibrowanej długości testowej.

$EBi:Tr:CT$ dwukierunkowy błąd pomiaru długości, gdy używane są osie współrzędnościowe współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie pomiaru „na obrazie”.

$EBi:St:CT$ dwukierunkowy błąd pomiaru długości ze stacjonarnymi osiami współrzędnościowymi współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie pomiar „w obrazie”.

$EUni::CT$ błąd wskazania (błąd pomiaru długości) podczas jednokierunkowego pomiaru kalibrowanej długości testowej.

$EUni:Tr:CT$ jednokierunkowy błąd pomiaru długości, gdy używane są osie współrzędnościowe współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie pomiar „na obrazie”.

$EUni:St:CT$ jednokierunkowy błąd pomiaru długości ze stacjonarnymi osiami współrzędnościowymi współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie pomiar „w obrazie”.

Oznaczenie największej (maksymalnej) dopuszczalnej wartości błędu dozwolonego przez specyfikacje zawiera symbol MPE , jak np. $EBi::CT, MPE$ i oznacza wartość ekstremalną (maksymalną) $EBi::CT$ dozwoloną przez specyfikację jako największy dopuszczalny błąd pomiaru długości.

Oprócz wymienionych rodzajów błędów rozróżnia się jeszcze błędy wymiaru zależne od materiału i geometrii, i tak:

- **GS** błąd wskazania zależny od materiału i geometrii (błąd średnicy), różnica pomiędzy średnicą dopasowania najmniejszej sumy kwadratów do wszystkich punktów pomiarowych z okrągłego wycięcia cylindra testowego a kalibrowaną wartością tej średnicy.

- **GS(Tr)** błąd średnicy zależny od materiału i geometrii z okrągłego wycięcia cylindra testowego (jako część cylindra stopniowego), gdy używane są osie współrzędnościowe współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie postępowym pomiar „na obrazie”.

- **GS(St)** błąd średnicy zależny od materiału i geometrii z okrągłego wycięcia cylindra testowego (jako część cylindra stopniowego) ze stacjonarnymi osiami współrzędnościowymi współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie stacjonarnego pomiaru CT: pomiar „w obrazie”.

- Jak również rozróżnia się błędy kształtu zależne od materiału i geometrii.

- **GF** błąd wskazania zależny od materiału i geometrii (błąd kształtu), w którym zakres odległości promieniowej Gaussa może być określony przez dopasowanie najmniejszej sumy kwadratów do wszystkich punktów z okrągłego wycięcia cylindra testowego (jako część cylindra stopniowego).

- **GF(Tr)** błąd kształtu zależny od materiału i geometrii z okrągłego wycięcia cylindra testowego (jako część cylindra stopniowego), gdy używane są osie współrzędnościowe współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie postępowym pomiar „na obrazie”.

- $GF(St)$ błąd kształtu zależny od materiału i geometrii z okrągłego wycięcia cylindra testowego (jako część cylindra stopniowego) ze stacjonarnymi osiami współrzędnościowymi współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie stacjonarnego pomiaru CT: pomiar „w obrazie”.

Błędy prostoliniowości zależne od materiału i geometrii

GG błąd wskazania zależny od materiału i geometrii (błąd prostoliniowości) osi wewnętrznego cylindra cylindra stopniowego.

$GG(Tr)$ błąd prostoliniowości osi wewnętrznego cylindra cylindra stopniowego zależny od materiału i geometrii, gdy używane są osie współrzędnościowe współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie postępowym pomiar „na obrazie”.

$GG(St)$ – błąd prostoliniowości osi wewnętrznego cylindra cylindra stopniowego zależny od materiału i geometrii ze stacjonarnymi osiami współrzędnościowymi współrzędnościowych systemów pomiarowych w trybie stacjonarnego pomiaru CT: pomiar „w obrazie”.

Uwagi dotyczące błędów pomiaru długości

Błąd pomiaru długości opisuje trójwymiarowe zachowanie błędu całego systemu, złożonego ze współrzędnościowego systemu pomiarowego i sensora w całej objętości pomiarowej. To zachowanie błędu wynika z nakładania się wielu oddzielnych błędów, np. nieskorygowane błędy systematyczne i nieskorygowane histerezy związane z ruchem osi współrzędnych, jak również błędy losowe. We współrzędnościowych systemach pomiarowych, stosujących zasadę tomografii komputerowej (CT), wartość błędu pomiaru długości może być w znacznym stopniu zależna od błędów sensora (szumy, niestabilność pracy itp.). Różne błędy pomiaru długości mogą wystąpić przy różnych rozmiarach pola pomiarowego (zastosowane powiększenie, rozmiar pojedynczego woksela). W związku z tym testy należy przeprowadzić w różnych ustawieniach wielkości pola pomiarowego (ponieważ to zachowanie jest inne niż w przypadku współrzędnościowych systemów stykowych). Błędy pomiaru długości mogą również zależeć od innych ustawień parametrów, takich jak ustawienia mocy.

Jeżeli pomiary obejmują użycie dodatkowego wyposażenia, takiego jak obrotowe/skrętne przeguby lub innego sprzętu do regulacji pochyleń / nachyleń, błędy pomiarowe wynikające z nich powinny być uwzględniane przy obliczaniu błędu pomiaru długości. W przeciwnym razie tych urządzeń należy unikać.

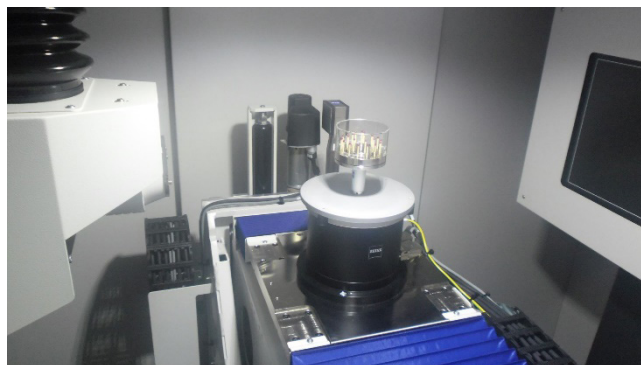
Wzorce referencyjne

Określenie błędu dwukierunkowego pomiaru długości polega na zastosowaniu wzorców referencyjnych z materialnymi miarami długości, takich jak wzorce kulkowe z dwiema lub większą liczbą kul (rys. 2), równoległe płytki wzorcowe, stopniowe płytki wzorcowe jako wzorce stopniowe (określane poniżej jako płytki wzorcowe), płyty kulowe, płyty z otworami lub płyty ze sferycznymi nasadkami (kapsłami) lub kostki. W ten sposób wszystkie długości testowe potrzebne do ISO-zgodnego pomiaru błędu pomiaru długości mogą być realizowane przy użyciu jednego wzorca referencyjnego.

Przykład ustawienia wzorca na obrotowym stole pomiarowym tomografu przedstawiono na rys. 3 – podczas badania dokładności tomografu METROTOM 800.



Rys. 2. Przykłady wzorców z elementami kulistymi wykonane w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej



Rys. 3. Przykład zastosowania wzorca z elementami kulistymi do badania dokładności tomografu w wyznaczeniu błędów pomiaru długości

Chropowatość i odchyłki kształtu mierzonej powierzchni wzorca referencyjnego powinny być – jako referencyjne warunki pracy dla tego testu – mniejsze niż 20% którejkolwiek podanej wartości $P::CT_{,MPE}$ (tj. $PForm.Sph.1x25::CT_{,MPE}$, $PForm.Sph.D95%::CT_{,MPE}$, $PSize.Sph.1x25::CT_{,MPE}$ i $PSize.Sph.All::CT_{,MPE}$). Ponieważ różne materiały mają różne właściwości radiologiczne, co może prowadzić do różnych błędów pomiaru długości, muszą być one podane. W przypadku gdy producent nie określił materiału lub powierzchni wzorca referencyjnego, użytkownik może wybrać go swobodnie.

Dopuszczalne jest używanie tego samego wzorca referencyjnego do pomiaru błędów próbkowania i do pomiaru błędów pomiaru długości tak długo, jak wymagania pojedynczych części testu są spełnione – wliczając kalibrację wszystkich wymaganych geometrii w odniesieniu do długości, wymiaru i kształtu. Aneks B opisywanego projektu normy przedstawia wielokulowy wzorec referencyjny, który może być stosowany do badania błędów próbkowania i badania błędu pomiaru długości.

Procedura wyznaczania błędów pomiaru długości

Zaleca się wykonanie testu poprzez zmierzenie długości w siedmiu różnych kierunkach przestrzennych dla każdego stopnia wielkości badanego pola pomiarowego. Te kierunki przestrzenne powinny obejmować kierunki pionowe, poziome i ukośne.

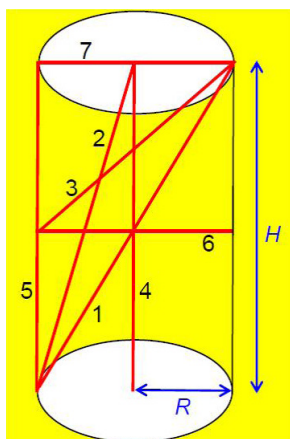
Możliwy wybór dla kierunku testu, tj. linii pomiarowe, jest podany w tablicy. Na rys. 4 przedstawiono graficzny widok orientacji linii pomiarowych w objętości pomiarowej. Jeżeli nie jest to technicznie możliwe, podobne pozycje powinny być wybrane. Cztery z siedmiu pozycji muszą być wybrane zgodnie z informacją podaną w tablicy (oznaczone jako wymagane). Pozostałe pozycje mogą być dowolnie wybrane przez operatora. Pozycja 1 jest pozycją domyślną. Pozycja ta powinna być wybrana, ilekroć jest to technicznie możliwe.

Pięć długości testowych powinno być zmierzonych trzykrotnie (powtórz $i = 1, 2, 3$) każda we wszystkich pozycjach i kierunkach. Najmniejsza długość testowa nie powinna być mniejsza niż 30 mm, największa powinna pokrywać – jako referencyjne warunki pracy dla tego testu – przynajmniej 66% przekątnej przestrzennej objętości pomiarowej w odpowiedniej badanej wielkości pola pomiarowego. Pozostałe długości testowe powinny być tak dobrane, aby pokryły one długość w przybliżeniu jednolicie. Schemat testowy opisany w ten sposób zawiera zazwyczaj 210 pomiarów długości (7 kierunków, 5 długości w każdym kierunku, trzykrotne powtórzenie każdego pomiaru, wszystkie pomiary wykonane w dwóch wielkościach pola pomiarowego).

TABLICA. Orientacje położenia wzorca w objętości pomiarowej

Numer pozycji	Orientacja w objętości (przestrzeni) pomiarowej	Wymagane lub domyślne
1	Wzdłuż przekątnej w przestrzeni od punktu $(R, 0^\circ, 0)$ do $(R, 180^\circ, H)$ Alternatywnie, kąt 45° względem osi obrotu może być wybrany – jeśli jest to technicznie możliwe	Domyślna pozycja wymagana
2	Wzdłuż przekątnej w przestrzeni od punktu $(R, 0^\circ, 0)$ do $(0, 0^\circ, H)$	Standardowe
3	Wzdłuż przekątnej w przestrzeni od punktu $(R, 0^\circ, H/2)$ do $(R, 180^\circ, H)$	Standardowe
4	Wzdłuż pionowej osi z punktu $(0, 0^\circ, 0)$ do $(0, 0^\circ, H)$	Wymagane
5	Wzdłuż pionowej osi z punktu $(R, 0^\circ, 0)$ do $(R, 0^\circ, H)$	Wymagane
6	Wzdłuż kierunku promieniowego od punktu $(R, 0^\circ, H/2)$ do $(R, 180^\circ, H/2)$	Standardowe
7	Wzdłuż kierunku promieniowego od punktu $(R, 0^\circ, H)$ do $(R, 180^\circ, H)$	Wymagane

UWAGA. Do specyfikacji w tej tabeli przyjmuje się przeciwległe narożniki objętości pomiarowej $(R, 0^\circ, 0)$ i $(R, 180^\circ, H)$ we współrzędnych cylindrycznych (r, φ, z) cylindrycznej objętości pomiarowej o promieniu $r = R$ i całkowitej wysokości $z = H$.
Tabela nie bierze pod uwagę ograniczonej możliwości pomiaru w granicach przestrzeni pomiarowej.
Tabela przedstawia ogólny schemat orientacji w przestrzeni pomiarowej. Dokładne kąty, tj. dla ustawień ukośnych, mogą się zmieniać w zależności od wymogów technicznych.
Podane wskazówki są z założenia poświęcone osiowym CT z osią obrotu równoległą do osi z podanego cylindrycznego układu współrzędnych.



Rys. 4. Pozycje wzorców materiałowych w wyznaczaniu błędów pomiaru długości: 1, 2, 3 – pozycje ukośne, 4, 5 – pozycje pionowe, 6, 7 – pozycje poziome (promieniowe)

Określona przez producenta maksymalna głębokość penetracji przy pomiarze błędów pomiaru długości przy użyciu wzorców referencyjnych wykonanych z danego materiału $L_{max,E}$ (materiał) nie może być przekroczona w żadnym pomiarze dla oceny błędów pomiaru długości. Oświadczenie to musi być respektowane do wszystkich projekcji rentgenowskich podlegających ocenie do obliczenia błędów pomiaru długości.

Błąd dwukierunkowego pomiaru długości jest określony osobno dla różnych trybów pomiaru:

- błąd pomiaru długości w stacjonarnym trybie pomiaru „w obrazie” jest określony jako $EBi::St:CT$. Ten pomiar bę-

dzie zawsze stosowany, gdy współrzędnościowy system pomiarowy umożliwia ten tryb pracy.

- błąd pomiaru długości w postępowym trybie pomiaru „na obrazie” jest określony jako $EBi::Tr:CT$. Ten pomiar będzie zawsze stosowany, gdy współrzędnościowy system pomiarowy umożliwia ten tryb pracy.

Użyty wzorec referencyjny powinien mieć – jako referencyjne warunki pracy do tego testu – współczynniki rozszerzalności większe niż $2 \times 10^{-6} K^{-1}$. Jeśli to nie jest spełnione, odpowiednie obliczenia zastępcze są przeprowadzane dla współczynnika rozszerzalności 8 do $13 \times 10^{-6} K^{-1}$ lub dodatkowa długość testowa jest mierzona na wzorcu, który ma współczynnik rozszerzalności 8 do $13 \times 10^{-6} K^{-1}$. Długość testowa powinna stanowić ok. 50% największej długości w objętości pomiarowej.

W przypadku gdy do obliczania charakterystyk są stosowane płytki wzorcowe, dwukierunkowa długość testowa jest obliczana z odległości między dwoma punktami pomiarowymi z przeciwnych powierzchni płytki wzorcowej. Różnica pomiędzy długością testową La (ocenioną, tj. zmierzoną wartością) i kalibrowanym średnim wymiarem Lr (wartością referencyjną) płytki wzorcowej (ISO 3650), jest błędem pomiaru długości $EBi::CT$. $EBi::CT = La - Lr$.

W przypadku gdy do obliczenia błędów pomiaru długości jako wzorce referencyjne używane są wzorce kulowe, płyty kulowe lub płyty z otworami, środki (pozycje) dwóch mierzonych kul lub cylindrów powinny być obliczone dla każdej długości testowej z punktów próbkowania przez indywidualne dopasowanie odpowiednich kul lub cylindrów. Odległość między dwoma środkami kul lub cylindrów to oceniona wartość Lsa długości testowej. Różnica pomiędzy ocenioną wartością Lsa i referencyjną wartością Lsr to błąd odległości kuli SD .

Ocena

Ocena jest niezależna od tego, czy użyte są płytki wzorcowe, wzorce kulowe, płyty kulowe czy płyty z otworami i jest taka sama dla wszystkich linii pomiarowych.

Wartość niepewności rozszerzonej testu (ISO 23165) U zastosowanej metody jest brana pod uwagę przy porównywaniu błędów pomiaru długości z największym dopuszczalnym błędem $EBi::CT, MPE$ (patrz ISO 14253-1).

$|EBi::CT| \leq |EBi::CT, MPE| - U$ do przeprowadzenia testu przez producenta w celu wykazania zgodności z największym dopuszczalnym błędem $EBi::CT, MPE$.

$|EBi::CT| > |EBi::CT, MPE| + U$ do przeprowadzenia testu przez nabywcę w celu wykazania niezgodności z największym dopuszczalnym błędem $EBi::CT, MPE$.

Nie więcej niż pięć z 35 długości testowych może mieć maksymalnie jedną wartość $EBi::CT$ z trzech pomiarów, która jest większa niż największy dopuszczalny błąd $EBi::CT, MPE$, biorąc pod uwagę wartość niepewności rozszerzonej testu.

Dla każdej wartości większej niż limit pomiar odpowiedniej długości testowej powinien być powtarzany trzykrotnie w położeniu, w którym największy dopuszczalny błąd został przekroczony. Jeśli wszystkie wartości błędów pomiaru długości $EBi::CT$ uzyskane przez te powtarzane pomiary leżą w zakresie największego dopuszczalnego błędów $EBi::CT, MPE$, biorąc pod uwagę wartość niepewności testu, największy dopuszczalny błąd jest przestrzegany.

Jest to przydatne w celu pokazania błędów pomiaru długości z ich największymi dopuszczalnymi wartościami i niepewnością metody badawczej na diagramie. Istnieją dwie opcje diagramu: albo żeby zmniejszyć największe do-

puszczalne błędy $E_{Bi}::CT, MPE$ przez wartość niepewności rozszerzonej testu U , albo żeby dodać wartość niepewności testu do każdej mierzonej wartości jako słupek błędów na diagramie.

Skutki zależne od materiału i geometrii

Wady materiału i geometrii przedmiotu mierzonego są szczególnie widoczne w pomiarach tomograficznych, w odróżnieniu od klasycznych współrzędnościowych systemów pomiarowych. Staje się to widoczne np. przez promieniowanie rozproszone i artefakty związane ze wzmocnieniem wiązki w rekonstruowanej objętości. Opisane metody, w odniesieniu do wyznaczania błędów pomiaru długości i błędów próbkowania, obejmują te skutki jedynie w ograniczonym stopniu, zwłaszcza tam, gdzie nie ma płytek wzorcowych stosowanych do wyznaczania błędów pomiaru długości. Zaleca się, aby testy były przeprowadzone przez użytkownika dla typowych materiałów i geometrii przedmiotu mierzonego używanego w danym systemie. Mogą to być np. ustalenie niepewności pomiaru analogicznie do ISO 15530-3 lub innych wytycznych ustalania niepewności przy pomiarze przedmiotu na współrzędnościowych systemach pomiarowych z tomografią komputerową.

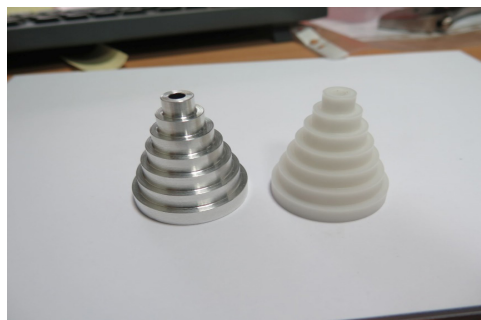
Najbardziej niezawodna metoda określenia skutków zależnych od materiału i geometrii polega na pomiarze kalibrowanych przedmiotów na współrzędnościowym systemie pomiarowym i porównania wyników z wartościami referencyjnymi ocenionymi na podstawie atestowanych metod (np. kalibracji za pomocą stykowych CMS z dołączoną niepewnością rozszerzoną kalibracji). To może być jeden z elementów badania przydatności procesu pomiarowego. Alternatywnie mogą być badane typowe wywzorcowane części. Dodatkowo, największe dopuszczalne błędy mogą być uzgodnione pomiędzy użytkownikiem a producentem.

Jedną z możliwości przybliżonego określenia skutków zależnych od materiału i geometrii polega na pomiarze pomiaru odpowiednich wzorców referencyjnych za pomocą współrzędnościowego systemu pomiarowego i porównania wyników z wartościami referencyjnymi ocenionymi na podstawie atestowanych metod (np. kalibracji za pomocą stykowych CMS z dołączoną niepewnością rozszerzoną kalibracji). Niezbędne jest zapewnienie, aby materiał i wymiary wzorca referencyjnego były podobne do elementów, które będą mierzone.

Użytymi wzorcami referencyjnymi mogą być cylindryczne wzorce stopniowe (rys. 5) z co najmniej pięcioma, a co najwyżej dziesięcioma różnymi średnicami zewnętrznymi i wspólnym otworem cylindrycznym pełnej długości. Wskazane jest, aby wybrać taki sam materiał wzorca referencyjnego jak przedmiotów, które mają być mierzone, w przeciwnym wypadku niemożliwe jest przybliżone określenie wpływu materiału i geometrii na pomiar. Stosunek największej średnicy zewnętrznej do średnicy wewnętrznej musi wynosić co najmniej 5. Wysokości wszystkich stopni muszą być równe, a stosunek wysokości całego wzorca stopniowego do największej średnicy zewnętrznej powinien zawierać się w zakresie od 0,8 do 1,2. Przyrost wymiarów średnic jest liniowy.

Parametry GS i GF i ustawienia systemu referencyjnego dla charakterystyki GG opisane w dalszej części tekstu są utworzone na podstawie dopasowania najmniejszych kwadratów (Gausa) odpowiadającego elementu kształtowego o niezablokowanym promieniu i pozycji dopasowanego elementu.

Parametr GS informuje o błędzie mierzonej średnicy wewnętrznej lub zewnętrznej Da ocenionej, kalibrowanej



Rys. 5. Przykład cylindrycznego wzorca stopniowego do wyznaczania parametrów GS , GG i GF

wartości średnicy Dr . GS jest obliczone jako $GS = Da - Dr$.

Parametr GF zmierzonych segmentów kołowych jest obliczany jako zakres błędów promieniowych punktów danych w stosunku do dopasowanego okręgu. Wielkości mierzone GS i GF podaje się dla wewnętrznej i zewnętrznej średnicy każdego stopnia.

Parametr GG opisuje odchyłki prostoliniowości osi wewnętrznej otworu obliczonego ze środków wszystkich przekrojów kołowych, który zawiera środki wszystkich przekrojów kołowych. Ponieważ wielkość bezwzględna, a zatem grubość materiału do prześwietlenia wpływają na wartość pomiaru, należy podać promienie dla wszystkich pomiarów.

Odchyłka prostoliniowości otworu i odchyłka kształtu kulistych segmentów wzorca referencyjnego powinny być wzięte pod uwagę przy obliczaniu wartości niepewności rozszerzonej testu (patrz ISO 23165).

Procedura testowa: wzorec referencyjny jest umieszczony w objętości pomiarowej przy wyraźnie różnych kątach nachylenia względem osi obrotu współrzędnościowego systemu pomiarowego. Pomiar stopni wzorca referencyjnego jest wykonywany za każdym razem w ramach pojedynczego pomiaru CT. Wszystkie pomiary CT wzorca referencyjnego przy różnych kątach nachylenia względem osi obrotowej CMS, stosującego zasadę tomografii komputerowej, są wykonywane w tej samej wielkości pola pomiarowego.

Dwie metody mogą być zastosowane do analizowania właściwości elementów geometrycznych i obszarów powierzchniowych:

- **Metoda globalnego układu współrzędnych przedmiotu mierzonego:** Jeden przekrój prostopadły do osi wewnętrznej wzorca cylindrycznego, w środku odpowiedniego stopnia wzorca referencyjnego, jest analizowany. Musi to być poprzedzone obliczeniowym określeniem wewnętrznej osi otworu wzorca, w oparciu o dane TK (metoda najmniejszych kwadratów lub Gausa dopasowania linii prostej do punktów reprezentujących środki segmentów kulistych odpowiednich płaszczyzn). Korzystając z tej metody, błędy prostopadłości wzorca referencyjnego (wewnętrznej osi walca do bocznej powierzchni cylindra zewnętrznego i wewnętrznej) są zawarte w całości w wielkości mierzonej.
- **Metoda lokalnego układu współrzędnych przedmiotu mierzonego:** Dla każdego stopnia, oś odpowiadającego mu walca wewnętrznej lub zewnętrznej ustala się lokalnie za pomocą wzorca dopasowanego do zmierzonych danych według metody Gausa. Przekrój, który ma być dopasowany do danych pomiarowych, jest prostopadły do obliczonej osi cylindra w połowie wysokości odpowiedniego stopnia. Korzystając z tej metody, błędy prostopadłości wzorca referencyjnego (wewnętrzna oś cylindra do bocznej powierzchni cylindrów wewnętrznej i zewnętrznej) nie są uwzględnione w wielkościach mierzonych.

Przy użyciu obu metod segment przechodzący przez dane pomiarowe powinien znajdować się w środku wysokości stopnia. W każdym przypadku segment powinien być w miejscach, w których wzorzec został wykalibrowany. Wszelkie odstępstwa od powyższego, należy wziąć pod uwagę w wartości niepewności testu.

Określenie zewnętrznego i wewnętrznego promienia kołowych segmentów odbywa się zawsze poprzez obliczenie dopasowanego okręgu Gaussa. Kształt zmierzonych segmentów kołowych jest obliczany jako rozstęp błędów promieniowych względem elementu kompensacyjnego. Gęstość punktów pomiarowych stosowanych do określenia segmentów kołowych powinna być równa gęstości punktów używanych podczas normalnej pracy współrzędnościowego systemu pomiarowego. Zastosowanie metod filtrowania i korekty obrazu, które różnią się od normalnej pracy współrzędnościowego systemu pomiarowego, powinno być określone.

Testowanie błędów wymiaru i odchyłek kształtu zależnych od materiału i geometrii odbywa się dla dwóch dowolnie wybranych pozycjach kątowych wzorców referencyjnych w stosunku do osi obrotu współrzędnościowego systemu pomiarowego. Różnica między dwoma kątami powinna wynosić co najmniej 30° między dwoma pomiarami.

Analiza wyników

Największe dopuszczalne błędy $GS_{,MPE}$, $GF_{,MPE}$ i $GG_{,MPE}$ są określone przez producenta.

Specyfikacja dotycząca błędów wymiaru i kształtu zależnych od materiału i geometrii jest spełniona, jeśli obliczone wartości GS , GF and GG , biorąc pod uwagę odpowiednią wartość niepewności testowej U , są mniejsze niż określone największe dopuszczalne błędy $GS_{,MPE}$, $GF_{,MPE}$ and $GG_{,MPE}$ (patrz ISO 14253-1). Wartość testowej niepewności rozszerzonej U jak podano w ISO 23165 jest brana pod uwagę.

Różnica między wykonaniem testu przez producenta i przez nabywcę (zasada decyzji dla wykazania zgodności oraz do wykazania niezgodności (zgodnie z ISO 14253-1) jest następująca:

$|GY| \leq GY_{,MPE} - U$ do przeprowadzenia testu przez producenta w celu wykazania zgodności z największymi dopuszczalnymi błędami $GY_{,MPE}$ and $GY=GS$, GG lub GF

$|GY| > GY_{,MPE} + U$ do przeprowadzenia testu przez nabywcę w celu wykazania niezgodności z największymi dopuszczalnymi błędami $GY_{,MPE}$ and $GY=GS$, GG lub GF .

Jeśli odpowiednie największe dopuszczalne błędy $GY_{,MPE} \pm U$ są przekroczone jedynie jednokrotnie, wówczas pomiar powinien być powtórzony raz (po wyczyszczeniu wzorca). Jeśli zmierzone wartości osiągają lub są mniejsze niż największe dopuszczalne błędy $GY_{,MPE} \pm U$ w powtarzającym pomiarze, biorąc pod uwagę niepewność U , badanie odbiorcze zakończone jest sukcesem (oświadczenie o zgodności, gdy badanie przeprowadzane jest przez producenta, lub niestwierdzenie niezgodności, gdy jest ono wykonywane przez nabywcę). Największe dopuszczalne błędy charakterystyk powinny być spełnione we wszystkich warunkach dopuszczalnych przez producenta. Dotyczy to w szczególności wzorców referencyjnych i parametrów filtrów.

Korzystne jest przedstawienie graficzne wyników wyznaczonych błędów wymiaru i kształtu zależnych od geometrii. Wyniki pomiaru wzorca referencyjnego przy różnych nachyleniach osi obrotu należy pokazać na jednym schemacie. W uzupełnieniu do zmierzonej wartości charakte-

rystyki, diagramy powinny pokazywać również największe dopuszczalne błędy służące do oceny zgodności oraz odpowiednie niepewności zmierzonych wartości. Wartości niepewności testu powinny być pokazane albo jako słupki w mierzonych wartościach danej charakterystyki lub jako zmniejszenie (przypadek $GY_{,MPE} - U$), lub zwiększenie (przypadek $GY_{,MPE} + U$) ograniczeń największego dopuszczalnego błędu.

Uwagi dotyczące projektowanej normy

- Projekt normy silnie nawiązuje do metod badania dokładności współrzędnościowych maszyn pomiarowych, tym samym nie uwzględnia wielu aspektów materiałowych np. związanych z defektoskopią. Projekt jest rozwinięciem pewnych ustaleń zawartych w sprawdzonych w praktyce wytycznych VDI/VDE 2630 ujętych w podrozdziale IX.56.
- Projekt normy o objętości 63 stron zawiera część główną ujętą na stronach 1–42 oraz dodatkowo części uzupełniające jako informacje o następujących tytułach:
 - A. Metrologiczna strukturalna rozdzielczość do pomiarów wymiarowych.
 - B. Opis wielokulowych wzorców referencyjnych.
 - C. Przykłady zastosowania metody badania błędu wymiaru zależnego od materiału i geometrii przy użyciu cylindrycznego wzorca stopniowego.
 - D. Opis trybów pomiaru CT (Tr „na obrazie” i Tk „w obrazie”).
 - E. Specyfikacja błędów jednokierunkowego pomiaru długości.
- Projekt normy zawiera szereg komentarzy, często odwołujący się do czytelnika, oczekując zgłoszenia ewentualnych uwag lub uzupełnień w celu udoskonalenia normy przed jej oficjalnym ogłoszeniem.

LITERATURA

1. Ratajczyk E., Woźniak A. „Współrzędnościowe Systemy pomiarowe”. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
2. Cierniak R. „Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne”. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2005.
3. Jezierski G. „Tomografia przemysłowa”. Warszawa: WNT, 1993.
4. Kielczyk J. „Radiografia przemysłowa”. Warszawa: Wyd. Gamma, 2006.
5. VDI/VDE 2630. Blatt 1.3: Computertomografie in der dimensionale len Messtechnik. Düsseldorf: 2009
6. ISO CT 10360-11: Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and verification tests for coordinate measuring systems (CMS): CMMs using the principle of computed tomography (CT).
7. Ratajczyk E. „Tomografy komputerowe CT w zastosowaniach przemysłowych. Cz. II. Oprogramowania i parametry dokładności i metody ich wyznaczania”. Warszawa: *Mechanik*. Nr 5–6 (2011): s. 474–479.
8. Kowaluk T., Ratajczyk E. „Dokładność tomografów przemysłowych CT w wyznaczaniu wymiarów geometrycznych”. *Pomiary Automatyka Kontrola (PAK)*. T. 59, nr 5 (2013): s. 462–447.
9. Bartscher M., Hilpert U., Goebbels J., Weidemann G. „Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 56 (2007): pp. 495–498.
10. Wieczorowski M., Gapinski B. “X-ray CT in metrology of geometric feature”. *ACTA Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*. Iss. VII (2014): 95–100.
11. Weckenmann A. “Micro measurements using CT”. *Symposium on Computed Tomography applied to Dimensional Control*. Berlin (Niemcy), 2009.
12. Kruth J.P., Bartscher M., Carmignato S., Schmitt R., DE Chiffre L., Weckenmann A. “Computed tomography for dimensional metrology”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 60 (2011): pp. 821–842.
13. Lettenbauer H., Georgi B., Weiss D. “Verification of the Accuracy of CT Systems for Measuring Technology”. *Innovation SPECIAL Metrology, The Magazine from Carl Zeiss* 10/2009.
14. Lettenbauer H. “Metrotomography® – High precision CT-Metrology in a new dimension”. *Advances in Coordinate Metrology*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsko-Białej, Bielsko-Biała 2010. ■