

# Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych

Eugeniusz Ratajczyk

Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono najnowszą generację urządzeń pomiarowych wchodzących do przemysłu i jednostek badawczych, a mianowicie tomografię komputerową CT. Opisano istotę pomiarów tomograficznych, zasadę działania i budowę tomografów, ich funkcje i oprogramowanie. Następnie przedstawiono liczne przykłady zastosowań w wyznaczaniu wymiarów geometrycznych, zarówno w odniesieniu do modelu CAD, jak i tworzeniu modelu w zakresie inżynierii odwrotnej. Przedstawiono również przykłady wykrywania wad materiału w zakresie defektoskopii.

**Słowa kluczowe:** tomograf komputerowy CT, lampa rtg, detektor, defektoskopia, model CAD, inżynieria odwrotna

Dotyychczas tomografia komputerowa CT znana była z zastosowań medycznych. Współtwórcami tomografu komputerowego dla medycyny byli Allan MacLeod Cormack (1924–1998) i Godfrey Newbold Hounsfield (1919–2004), którzy w 1979 r. otrzymali Nagrodę Nobla, chociaż pierwszy tomograf został zainstalowany w 1973 r.

Tomografia komputerowa CT (ang. *Computed Tomography*) jest rodzajem spektroskopii rentgenowskiej, metodą diagnostyczną pozwalającą na uzyskanie obrazów warstwowych badanego obiektu. Wykorzystuje ona złożenie projekcji obiektu, wykonanych z różnych kierunków, do utworzenia obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D) [1–3].

Tworzenie obrazu tomograficznego polega na pomiarze pochłaniania promieniowania przechodzącego przez obiekt. Objętość obiektu podzielona jest na małe komórki, zwane voxelami, w których liniowy współczynnik pochłaniania promieniowania jest taki sam. Zrekonstruowany obraz przekrojowy jest ilościową mapą liniowego współczynnika pochłaniania promieniowania w voxelach wchodzących w skład skanowanej warstwy. Rozkład współczynników pochłaniania promieniowania jest obliczany przez komputer, dlatego metoda nosi nazwę tomografii komputerowej.

Podstawowym sposobem badania jest skierowanie na badany obiekt wiązki promieniowania X i rejestracja jego natężenia po drugiej stronie na panelu detektorów. Promieniowanie X, przechodząc przez badany obiekt, doznaje osłabienia, które jest funkcją energii promieniowania, rodzaju i grubości badanego materiału. Zmiana natężenia promieniowania równoległej wiązki o jednakowej energii po przejściu przez obiekt opisana jest zależnością [1]:

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

gdzie:  $I$  – natężenie promieniowania po przejściu przez obiekt,  $I_0$  – początkowe natężenie promieniowania,  $\mu_g$  – liniowy współczynnik absorpcji promieniowania charakterystyczny

dla danego materiału i określonej długości fali promieniowania X,  $g$  – grubość badanego materiału.

Liniowy współczynnik osłabienia promieniowania zależy od liczby atomowej i gęstości materiału. Jest on opisany przez prawo Bragga i Pierca [1]:

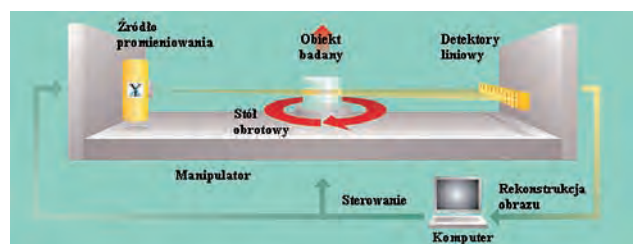
$$= k\lambda^3 Z^3 \quad (2)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik proporcjonalności,  $\lambda$  – długość fali promieniowania,  $Z$  – liczba atomowa materiału.

O ile w medycynie tomografia ma charakter urządzenia diagnostycznego, które pozwala na przestrzenną rekonstrukcję poszczególnych narządów człowieka, o tyle w zastosowaniach technicznych ten obszar działań jest nieco inny, chociaż idea tomografii CT jest podobna. W tomografach medycznych obiekt, jakim jest człowiek w stanie spoczynku, może być poddany tylko przemieszczeniu poosiowemu, a detektor/detektory i lampa rentgenowska wykonują obroty wokół osi pacjenta, naświetlając go. W tomografach przemysłowych nie ma ograniczeń w odniesieniu do przemieszczeń badanego obiektu, a lampa i panel detektorów zajmują w większości przypadków stałe pozycje. Również czas naświetlenia nie gra istotnej roli – ma wpływ tylko na czasochłonność pomiaru.

W przemysłowej tomografii komputerowej najczęściej stosowane są dwa rodzaje układów projekcji [11]:

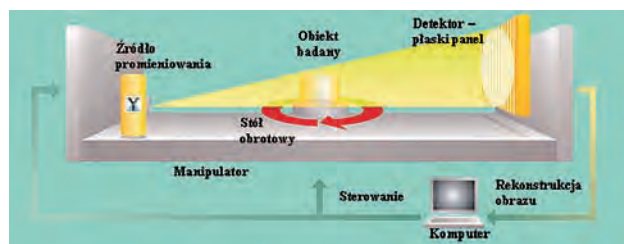
a) układ z równoległą wiązką promieniowania (rys. 1) – składa się z płaskiej wiązki promieniowania X, które jest emitowane w kierunku mierzonego obiektu znajdującego się na stole obrotowym. Po drugiej stronie badanego elementu umieszczony jest liniowy detektor rejestrujący sygnał pomiarowy. Badany przedmiot jest przemieszczany kątowno i liniowo w kierunku x, y, z lub też zachodzi przemieszczenie układu lampa rentgenowska – tablica detektorów. W drugim przypadku występuje złożenie dwóch składowych: ruchu wzdluznego sprzężonych ze sobą detektora liniowego i lampy, pozwalającego dokonać jednej projekcji oraz ruchu okrężnego wokół punktu centralnego, który to ruch pozwala zebrać wszystkie projekcje potrzebne do zrekonstruowania obrazu. W układzie tym wiązkę promieniowania X ogra-



**Rys. 1.** Schemat tomografu z płaską wiązką równoległą  
**Fig. 1.** Scheme with a parallel flat-beam CT

nicza się do wiązki płaskiej za pomocą odpowiedniej przesłony. Obraz badanego obiektu otrzymuje się przez zeskanowanie go z pewnym krokiem przesuwu obiektu w górę i wykonanie za każdym krokiem obrotu o  $360^\circ$ . Podczas obrotu obiektu o  $360^\circ$  uzyskuje się płaski obraz rentgenowski jednego przekroju mierzonego detalu. Na otrzymanie pełnego obrazu trójwymiarowego pozwala rekonstrukcja komputerowa, podczas której przetwarzane są zgromadzone dane z pomiarów.

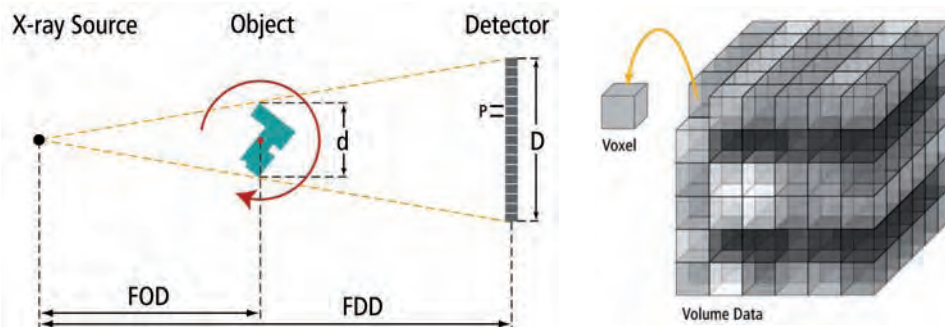
b) **układ z wiązką stożkową** – wiązka promieniowania uformowana jest w stożek. Źródłem promieniowania jest lampa rentgenowska o napięciu najczęściej w przedziale 150–450 kV. W układzie tym badany obiekt znajduje się na stole obrotowym, który porusza się względem nieruchomych: lampy i panelu detektorów. Po zastosowaniu przestrzennej wiązki rentgenowskiej (rys. 2) i detektora matrycowego, gdy obiekt wykona pełny obrót o  $360^\circ$ , otrzymuje się jeden przebieg całego przedmiotu.



Rys. 2. Schemat tomografu z wiązką stożkową  
Fig. 2. Scheme diagram of the CT with a cone beam

Dokładność końcowego odwzorowania zależy od liczby projekcji wykonanych dla pełnego obrotu detalu (minimum cztery na każdy stopień obrotu). W ten sposób, mając obrazy projekcji dla wielu przekrojów elementu, dokonuje się rekonstrukcji obrazu całego elementu za pomocą transformaty Radona [2]. Pozwala ona na odtworzenie obrazu trójwymiarowego obiektu z wielu rzutów tego przedmiotu. Metoda ta jest obecnie najczęściej wykorzystywana w przemysłowej tomografii komputerowej ze względu na szybkość rekonstrukcji obrazu oraz prostszą konstrukcję układu. Stosowana jest w sytuacjach, w których czas jest wartością krytyczną.

Jednostką obrazu przestrzennego 3D jest voxel – ang. *volumetric element* (odpowiednik piksela dla obrazu 2D), któremu odpowiada średnica przedmiotu  $d$  podzielona przez liczbę pikseli  $N$  ( $V = d/N$ ) – rys. 3.



Rys. 3. Niektóre parametry charakteryzujące tomografię CT  
Fig. 3. Some parameters characterizing the computed CT

## Zakres zadań tomografu i ich oprogramowania

Rekonstrukcja obrazu, dająca informację graficzną i liczbowa o badanym obiekcie, oparta jest na bardzo dużej liczbie danych. W celu ich przetworzenia, według określonej procedury, stosowane są stosunkowo złożone oprogramowania, które wymagają dużej mocy komputerów. Najczęściej stosuje się nie jeden, lecz dwa lub trzy komputery, przyporządkowując każdemu z nich określony pakiet zadań metrologicznych i sterujących.

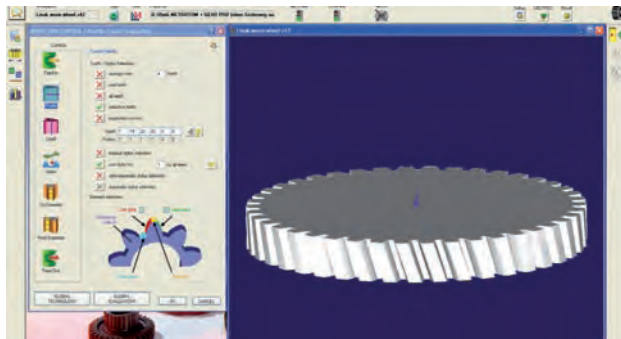
Pełny pakiet oprogramowania do zadań metrologicznych, tj. z pominięciem oprogramowania sterującego, obejmuje cztery podstawowe grupy operacji:

- standardowa geometria wymiarów,
- porównywanie wyników z modelami CAD,
- defektoskopia,
- inżynieria odwrotna.

Każdy producent tomografów oferuje określone, najczęściej własne oprogramowanie, chociaż spotyka się oprogramowania uniwersalne, zalecane do stosowania przez wielu producentów tomografów. Często do oprogramowania własnego dołączane jest oprogramowanie uzupełniające, opracowane przez firmy specjalizujące się w ich przygotowaniu. Przykładem może być firma C. Zeiss, która do wyznaczania wymiarów stosuje swoje oprogramowanie Calypso, używane w pomiarach współrzędnościowych, a do pozostałych zadań, głównie w szeroko pojętej defektoskopii, oprogramowanie VGStudio Max firmy Volume Graphics GmbH, natomiast do inżynierii odwrotnej program Dimension.

Firma MacroScience Technology do wykonywania wszystkich operacji oferuje oprogramowanie Helix CT. Tomografy komputerowe firmy Metris-Nikon bazują na oprogramowaniu Inspect-X, chociaż w ofercie występuje także uniwersalne oprogramowanie VGStudio Max. Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH – Phoenix x-ray stosuje oprogramowanie o symbolu x-act. Firma Werth Messtechnik korzysta z programu WinWerth, a firma Viscom oferuje oprogramowanie o symbolu S6002. Tomografy komputerowe firmy North Star Imaging Inc. obsługiwane są przez program efX-CT. Firma Wenzel Volumetrik do obsługi swego tomografu oferuje program exaCT.

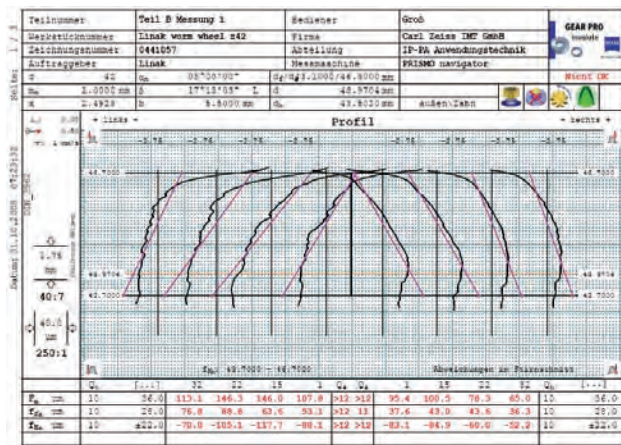
**Standardowa geometria wymiarów**, tak jak w klasycznej technice współrzędnościowej, opiera się na założeniu, że typowy przedmiot mechaniczny typu korpusowego jest opisywany przez punkty, proste, płaszczyzny, okręgi, sfery kuliste, stożki itp. Przez odpowiednie aproksymacje, na podstawie współrzędnych uzyskanych z pomiaru punktów, uzyskuje się wymagane wymiary. Mając współrzędne środków lub wymienionych figur można wyznaczyć odległości między nimi, a także wymagane przekroje i rzuty [4, 5], które dają podstawy do analizy wymiarowej badanego obiektu.



Rys. 4. Widok ekranu z pomiaru koła zębatego pakietu Gear Pro programu Calypso

Fig. 4. A screenshot of view measurement of gear by package Gear Pro program Calypso

Bardziej zaawansowane pomiary, przy użyciu pakietu Gear Pro oprogramowania Calypso firmy C. Zeiss, zilustrowano na rys. 4, gdzie przedstawiono wyniki pomiaru koła zębatego. Rysunek pokazuje możliwości tego programu, który pozwala na wyznaczenie wymiarów, korzystając bezpośrednio z wprowadzonych danych nominalnych lub z porównania z modelem CAD. Na uwagę zasługuje uzyskanie nie tylko wartości odchyłek poszczególnych parametrów koła zębatego (w tym przypadku zarysu ewolwenty), ale również graficznej ilustracji przebiegu zmian zarysu, co umożliwia jakościową ocenę tego parametru (rys. 5).

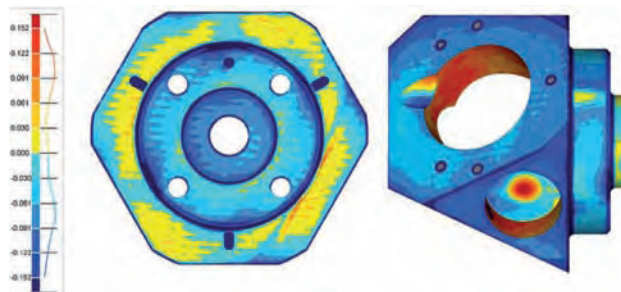


Rys. 5. Widok ekranu z wynikami pomiaru zarysu zęba koła zębatego w postaci graficznej i liczbowej

Fig. 5. A screenshot of the results of measurement of gear tooth profile in graphical and numerical

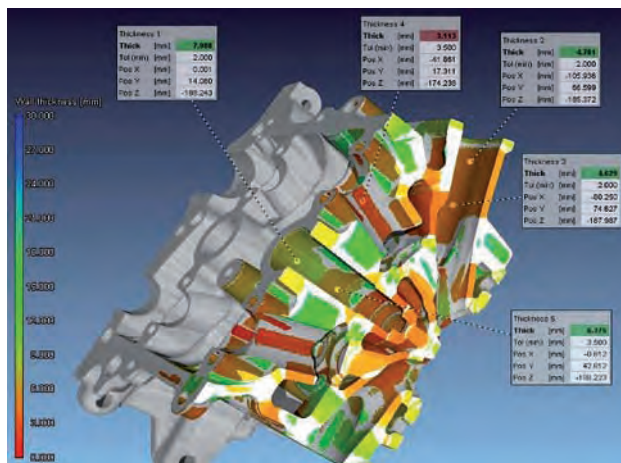
Porównywanie wyników z modelami CAD odbywa się przez naniesienie na siebie uzyskanej chmury punktów i wyłonionego z niej obiektu na znany model CAD, co umożliwia szybkie porównanie uzyskanych wyników z bazą odniesienia, jaką jest model z wymiarami nominalnymi. Oczywiście i w opcji standardowej geometrii wymiarów można uzyskać porównanie z uzyskanymi z pomiaru odchyłkami z wymiarami nominalnymi, po uprzednim jednak wprowadzeniu ich danych do komputera. Natomiast porównanie z modelem CAD daje pełny obraz zmian wymiarów przedmiotu, z zaznaczonymi kolorami odpowiednimi do wartości odchyłek, jak to widać na rys. 6. Po lewej stronie ekranu na pasku pionowym zaznaczone są wartości odchyłek odpowiednich dla danego koloru.

Na przedstawionym obrazie CAD pokazane są kierunki odchyłek oraz ich wartości, co pozwala na sprawdzenie, czy wymiary badanego przedmiotu mieszczą się w granicach tolerancji. Można również stwierdzić, w jakim kierunku przesunięte są wymiary badanego obiektu, a co za tym idzie, w jaki sposób należy wpłynąć na proces produkcyjny, aby wyeliminować braki w produkcji lub nie dopuścić do ich powstania.



Rys. 6. Porównanie z modelem CAD na podstawie oprogramowania Calypso firmy C. Zeiss

Fig. 6. The view of measured object in comparison with CAD model in Calypso software



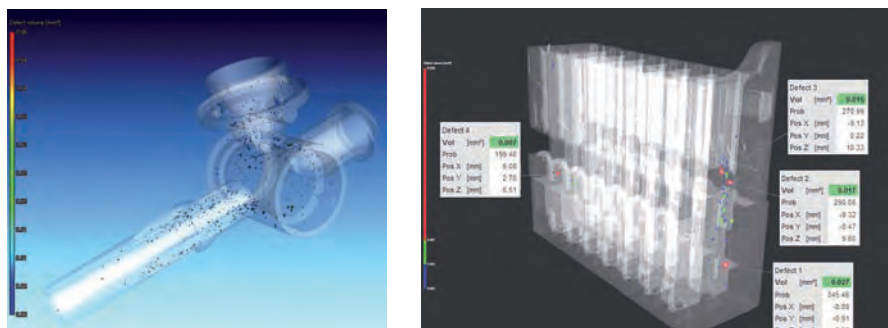
Rys. 7. Porównanie z modelem CAD z ikonami podającymi szczegółowe dane dla wybranych obszarów mierzonego przedmiotu

Fig. 7. Comparison with the CAD model with icons indicating the detailed data for selected areas of the measured object

Inny przykład postaci wyników mierzonego elementu, w tym przypadku głowicy silnika trzycylindrowego, zilustrowano na rys. 7. W celu uzyskania szczegółowych danych określonego obszaru badanego przedmiotu, takich jak wymiar nominalny, tolerancje i odchyłki, należy kliknąć na wybrany obszar – na rys. 7 wybrano pięć takich obszarów z zaznaczonymi danymi podanymi w ramkach.

### Defektoskopia

Do badań związanych z szeroko pojętą defektoskopią zalicza się nieniszczące badania obiektów, wykrywanie nieciągłości materiału, pęknięć, rozwarstwień, sprawdzanie poprawności montażu, szukanie porów, wtrąceń innych materiałów, pęcherzyków powietrza itp., jak również badania struktury materiałów, badania paleontologiczne skamielin czy obiektów organicznych oraz niektóre medyczne [6–8]. Na rys. 8 przedstawiono przykłady wyników badań przedmiotów w zakresie de-



**Rys. 8.** Przykładowe wyniki badań przedmiotów w zakresie defektoskopii przy użyciu oprogramowania VGStudio Max

**Fig. 8.** Example results of flaw detection of objects using the software VGStudio Max

fektoskopii i jakości montażu przy zastosowaniu często używanego w tomografii oprogramowania VGStudio Max.

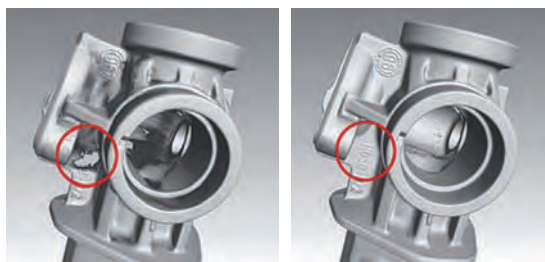
Możliwe jest wykrycie różnego rodzaju wtrąceń i wad materiału, ich charakteru, rozmieszczenia i wielkości. Na podziałce pionowej można odczytać wartości charakteryzujące wymiary wtrąceń i wad w funkcji ich koloru, a po wybraniu określonej nieciągłości uzyskać wartości liczbowe wady, m.in. jej wymiary w  $\text{mm}^3$  oraz współrzędne x, y, z położenia.

**Inżynieria odwrotna** jest doskonałą, szybką metodą radzenia sobie z budową obiektu, gdy nie ma dostępnego modelu CAD. Podczas pomiaru badanego przedmiotu otrzymywana jest tzw. chmura punktów, z której, w wyniku przeliczeń, uzyskuje się model 3D. Za pomocą inżynierii odwrotnej generowane są krzywizny i węzły, a w rezultacie uzyskiwany jest model CAD, akceptowany przez większość standardowych programów.

Proces inżynierii odwrotnej składa się z następujących kroków:

1. Zebranie tzw. chmury punktów i optymalizacja w celu poprawienia wydajności obliczeń i zwiększenia płynności powierzchni.

*Przez optymalizację rozumiane jest zmniejszenie liczby punktów przez filtrowanie danych (np. usunięcie punktów leżących w odległości większej niż 0,2 mm od pozostałych punktów) oraz odrzucenie punktów znajdujących się w niższych obszarach krzywizny. Zastosowanie filtra zmniejsza liczbę punktów, np. z ponad pięciu milionów do niespełna jednego miliona. Mimo pięciokrotnej redukcji liczby punktów szczegóły obiektu są dobrze rozpoznawane.*



**Rys. 9.** Efekty procesu inżynierii odwrotnej: a) powierzchnia z nieciągłością w postaci tzw. dziury, b) powierzchnia po wygładzeniu

**Fig. 9.** The effects of the reverse engineering process: a) the surface with discontinuity in the form of so-called holes, b) the surface after smoothing

2. Stworzenie siatki trójkątów przez łączenie punktów.

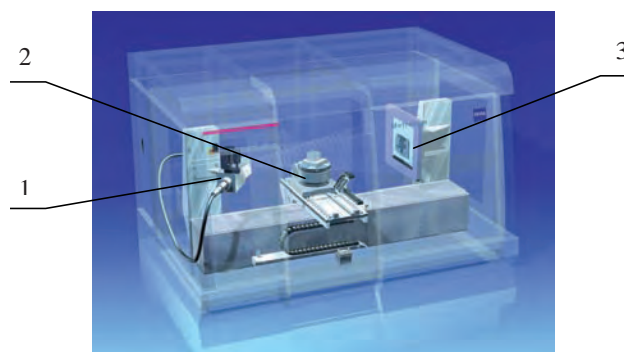
*Istnieje ryzyko błędnego zinterpretowania otworów podczas obróbki. Należy wtedy wprowadzić poprawki do uzyskanego modelu, możliwe jest wypełnienie przestrzeni siatką wielokątów. Na rys. 9a przedstawiono przedmiot po wypełnieniu powierzchni siatką trójkątów – widoczny jest efekt wygładzenia powierzchni przedmiotu. Natomiast na rys. 9b przedstawiono rezultaty eliminacji tzw. dziur – przedmiot jest ich pozbawiony (zaznaczony czerwonym okręgiem).*

*Wyglądanie przestrzeni między zaznaczonymi krawędziami. Otrzymany w ten sposób rysunek 3D importowany jest do programu obsługującego modele CAD. Jest to ostatni krok inżynierii odwrotnej. Dzięki temu badaniu uzyskiwany jest model przydatny podczas szybkiego prototypowania oraz badania nieznanymi obiektów.*

3. Kontynuowanie procesu wygładzania powierzchni, a przede wszystkim utworzenie krawędzi, tj. obrysowanie krawędzi przez złożenie serii obrazów pochodzących z kolejnych projekcji, obejmujące wyznaczenie krawędzi, krzywizn, prostych itp. Proces ten jest realizowany przez większość stosowanego w tomografii oprogramowania. Dla złożonych elementów proces znajdowania krawędzi jest stosunkowo czasochłonny.
4. Wyglądanie przestrzeni między zaznaczonymi krawędziami. Otrzymany w ten sposób rysunek 3D importowany jest do programu obsługującego modele CAD. Jest to ostatni krok inżynierii odwrotnej. Dzięki temu badaniu uzyskiwany jest model przydatny podczas szybkiego prototypowania oraz badania nieznanymi obiektów.

## Główne zespoły tomografu i ich funkcje

Do głównych zespołów tomografu zaliczają się: lampa rentgenowska 1 (rys. 10) i jej zasilacz, układ pozycjonujący mierzony element, 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. 10.

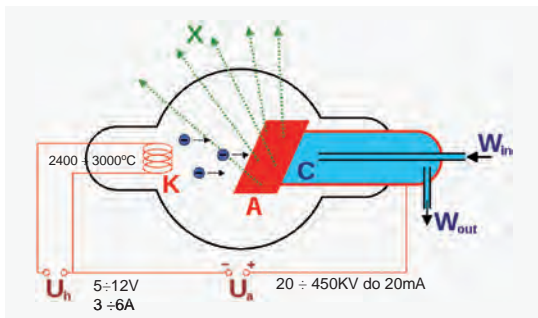


**Rys. 10.** Główne zespoły tomografu komputerowego CT na przykładzie tomografu Metrotom firmy C. Zeiss

**Fig. 10.** Main components of CT on the example of Metrotom C. Zeiss

Działanie matrycy detektorów może się opierać na różnych zjawiskach fizycznych, np. na jonizacji gazów. W najnowszej tomografii stosuje się detektory natężenia promieniowania rentgenowskiego zwane detektorami scyntylacyjnymi, które bazują na płytach amorficznych krzemu i selenu.

Główne parametry detektorów promieniowania rentgenowskiego charakteryzowane są przez: wydajność detekcji, energetyczną zdolność rozdzielczą, stabilność pomiarów w czasie, bezwładność, rozdzielczość przestrzenną detekcji, kontrastowość obrazu, odporność na zniszczenie przez napromieniowanie i szумы własne. W większości tomografów stosowane są detektory matrycowe, które osiągają rozdzielczość  $1024 \times 1024$  pikseli, co odpowiada rozdzielczości przestrzennej obrazu wynoszącej ponad miliard voxelów ( $1024^3$ ). Występują także detektory matrycowe o rozdzielczości wynoszącej  $2048 \times 2048$  pikseli.



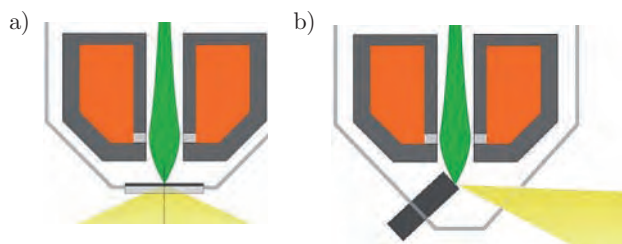
**Rys. 11.** Schemat działania lampy rentgenowskiej: K – żarówka katoda, A – anoda,  $W_{in}$  i  $W_{out}$  – wlot i wylot cieczy (C) chłodzącej anodę

**Fig. 11.** The scheme of X-ray tube operation: K – hot cathode, A – anode,  $W_{in}$  and  $W_{out}$  – inlet and outlet of liquid coolant

**Lampa rentgenowska** (rys. 11) emituje promienie X. Jest bańką próżniową z zatopionymi elektrodami: anodą i katodą w postaci wolframowej spirali (w tzw. jonowej lampie rentgenowskiej bańka wypełniona jest gazem pod ciśnieniem rzędu  $10^{-3}$  Tr).

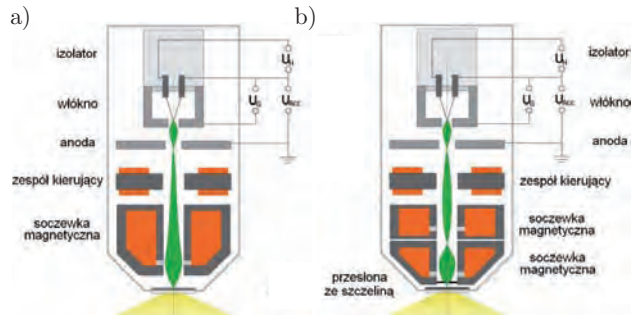
Wysokie napięcie (najczęściej w przedziale 150–450 kV) przyłożone do elektrod przyspiesza dodatnie jony (jonowa lampa rentgenowska) lub elektrony, które odrywają się z katody (elektronowa lampa rentgenowska). Czastki te, bombardując elektrodę (odpowiednio: antykatodę – jonowa lampa rentgenowska lub anodę – elektronowa lampa rentgenowska), emitują promieniowanie hamowania, będące strumieniem kwantów promieniowania X o ciągłym widmie energetycznym.

Promieniowanie hamowania jest efektem oddziaływania czastki z polami elektrostatycznymi jąder i elektronów w materii, z której wykonana jest anoda. Elektrony, po zderzeniu się z anodą, są w niej hamowane, w wyniku czego powstaje promieniowanie X. Jednak 99 % energii elektronów jest zamieniane w ciepło – stąd konieczność chłodzenia lampy. Zapewnia je ciecz chłodząca lub wirująca anoda. Istnieje wiele mechanizmów powstawania promieni rgt, a więc wiele ro-



**Rys. 12.** Schematy lamp rentgenowskich: a) typu transmisyjnego, b) typu kierunkowego [11]

**Fig. 12.** Schemes X-ray tubes: a) transmission type, b) directional type [11]



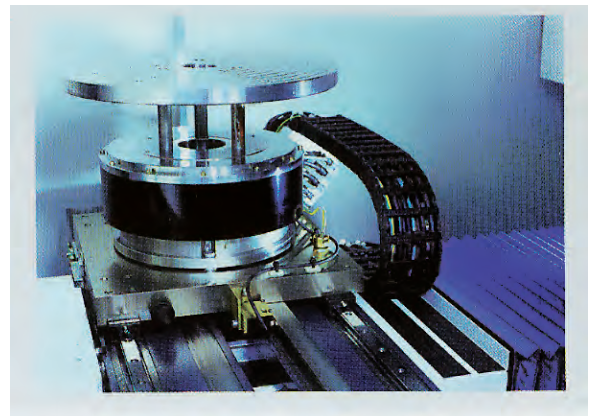
**Rys. 13.** Schematy lamp rentgenowskich: a) z mikrofokusem, b) z nanofokusem [11]

**Fig. 13.** Schemes of X-ray tubes: a) with microfocus, b) with nanofocus [11]

dziejów lamp rgt [bogatą kolekcję lamp rentgenowskich prowadzoną przez dr G. Jezierskiego można znaleźć na stronie [www.xraylamp.webd.pl](http://www.xraylamp.webd.pl)].

Lampy typu transmisyjnego (rys. 12a) odznaczają się dużym powiększeniem, a typu kierunkowego (rys. 12b) dużą mocą. Lampa z mikrofokusem (rys. 13a) charakteryzuje się niewielką minimalną odległością przedmiotu od ogniska i dużym powiększeniem. Lampa z nanofokusem (rys. 13b) ma rozbudowaną soczewkę magnetyczną i przysłonę, która minimalizuje wielkość plamki w ognisku.

Zestaw obrotowo-przesuwany (rys. 14) składa się z obrotowego stołu sterowanego cyfrowo oraz liniowego układu przemieszczenia, który służy do ustawiania przedmiotu w określonej odległości między lampą rentgenowską a matrycą detektorów.



**Rys. 14.** Przykładowy zestaw obrotowo-przesuwany [10]

**Fig. 14.** An exemplary rotating-shift set [10]

Układ pozycjonowania w większości tomografów składa się ze stołu obrotowego, na którym umieszczony jest badany obiekt, i prowadnic pozycjonujących stół obrotowy względem źródła promieniowania i detektora. Dodatkowo w tomografach z dużym zakresem pomiarowym źródło promieniowania i detektor umieszczone są na prowadnicach.

Główne parametry stołów obrotowych to dokładność pozycjonowania, która zawiera się w przedziale od części do kilkunastu µrad, przy rozdzielczości 0,2–10 µrad, oraz średnica stołu wynosząca 200–300 mm, przy obciążeniu stołu masą przedmiotu dochodzącą do nawet 100 kg.

Od prowadnicy liniowej, służącej do ustawiania odległości przedmiotu między lampą rentgenowską a matrycą de-

tektorów, nie wymaga się takiej dokładności jak od stołu pomiarowego. Zwykle jej zakres przemieszczeń nie przekracza 250 mm, z dokładnością wynoszącą 0,025 mm, przy powtarzalności pozycjonowania  $\pm 0,003$  mm.

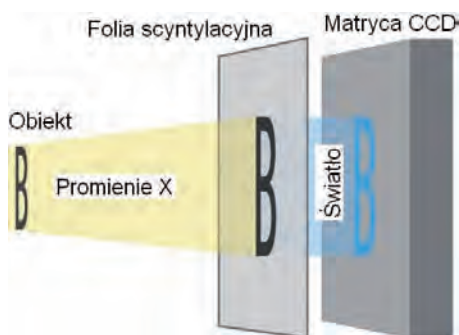
Głównymi źródłami błędów w układach pozycjonowania tomografów są: pochylenie detektora, zmiana położenia i pochylenie osi obrotu stołu obrotowego. Pierwsze z nich jest wyeliminowane, gdyż detektor znajduje się w stałej pozycji. Dlatego ważny jest dobór stołu obrotowego z możliwie najmniejszym osiowym błędem pozycjonowania i pochylenia powierzchni pomiarowej stołu.

**Detektor** jest przetwornikiem, który zamienia przechodzącą przez obiekt promieniowanie, zawierające informacje o badanym obiekcie, na sygnał elektroniczny zdalny do dalszego przetwarzania. System detekcji może składać się z pojedynczego elementu skanującego, liniowego układu elementów lub powierzchniowego układu elementów skanujących. Jest to bardzo ważny element układów wykorzystywanych w pomiarach tomograficznych, ponieważ od detektorów w dużym stopniu zależy jakość obrazu badanego obiektu, czas projekcji i wydajność pomiarów.

Działanie detektorów opiera się na różnych zjawiskach fizycznych:

- detektory oparte na jonizacji gazu,
- detektory matrycowe budowane na bazie amorficznego krzemu,
- detektory półprzewodnikowe,
- detektory scyntylacyjne,
- detektory konstruowane według technologii polegającej na wykorzystaniu elektrycznych lub magnetycznych zjawisk w ciałach stałych.

Obecnie dominują detektory scyntylacyjne, których schemat przedstawiono na rys. 15.



Rys. 15. Uproszczony schemat matrycy detektorów

Fig. 15. Simplified diagram of a matrix of detectors

Promienie X przenikają przez folię lub kryształ scyntylacyjny i zmieniają się w światło widzialne odbierane przez fotodiody, które generują sygnał elektryczny i po przetworzeniu na postać cyfrową przesyłają go do obróbki komputerowej. Warto wymienić parametry detektora matrycowego, np. firmy Hamamatsu. Produkuje ona dwa rodzaje detektorów matrycowych o symbolach C7942CA-22 i C7943CA-22. Są to detektory scyntylacyjne z kryształkiem jodku sodu (CsI) jako scyntylatorem. Detektor C7942CA-22 ma rozdzielczość  $2400 \times 2400$  pikseli, rozmiary pikseli  $50 \times 50$   $\mu\text{m}$ , aktywną powierzchnię o wymiarach  $120 \times 120$  mm, prędkość przetwarzania obrazów 9 klatek/s i rozdzielczość 8 linii/mm.

## Przykłady tomografów i ich parametry

Obecnie na rynku europejskim oferowane są tomografy do zastosowań przemysłowych, już nie tylko w zakresie defektoskopii, lecz także służące do pomiarów współrzędnościowych zarówno części, jak i zespołów mechanicznych oraz zespołów elektronicznych. Znane są tomografy następujących producentów:

- tomografy Metrotom firmy C. Zeiss [www.zeiss.pl],
- tomografy z serii XT H i XT V firmy Metris-Nikon [www.nikonmetrology.com],
- systemy tomograficzne 2D 3D firmy GE Measurement & Control Solutions – Phoenix | x-ray [www.phoenix-xray.com],
- system Y.CT firmy Yxlon International GmbH [www.yxlon.com],
- tomografy firmy Wenzel Volumetrik [www.volumetrik.com],
- systemy TomoScope i TomoCheck firmy Werth Messtechnik [www.werthmesstechnik.de],
- tomografy firmy Viscom Technology [www.viscom.com],
- tomografy firmy North Star Imaging Inc. [www.xviewct.com],
- tomografy firmy Saki Corporation [www.sakicorp.com].

Dalej zaprezentowano parametry i przykłady zastosowań niektórych z nich.

Firma C. Zeiss [10] wytwarza dwa rodzaje tomografów CT – model Metrotom 800 i Metrotom 1500. Na rys.1 przedstawiono ogólny widok tomografów Metrotom.

Tomograf komputerowy **Metrotom 800** (rys. 16b) o masie 5750 kg (bez szafy z częścią elektroniki i komputerem) ma wymiary  $2,2 \times 1,31 \times 1,96$  m. Wyposażony jest w lampę rentgenowską typu zamkniętego, chłodzoną powietrzem o zakresie 20–130 kV, przy maksymalnym poborze mocy 39 W i stożkowej generacji wiązki promieniowania rtg. Przestrzeń pomiarowa, składająca się z układu przesuwne X, Y, Z, ma zasięg w kierunku X 700 mm, a w kierunkach Y i Z 270 mm. Przestrzeń pomiarowa w płaszczyźnie X–Y wynosi 170 mm oraz w osi Z 140 mm. Stół obrotowy z talerzem do mocowania przedmiotów o maksymalnej masie 4 kg ma średnicę 170 mm. Matryca detektorów umieszczona jest w odległości 800 mm od lampy. Maksymalne powiększenie geo-



Rys. 16. Tomografy komputerowe CT firmy C. Zeiss: a) widok ogólny, b) Metrotom 800, c) Metrotom 1500

Fig. 16. Tomographs CT scanners C. Zeiss: a) general view, b) Metrotom 800, c) Metrotom 1500

metrii w zakresie 2D wynosi 45, a w zakresie 3D dla detalu o średnicy 4–40 mm. Rozdzielczość pionowa montażu wynosi 1536×1920, a rozmiar pojedynczego piksela 127×127 μm. Warunki prawidłowej pracy tomografu są spełnione, jeśli temperatura otoczenia mieści się w przedziale od +15 °C do +35 °C przy wilgotności 40–70 %, a temperatura w kabinie w czasie pomiaru wynosi 20 ± 2°C.

Podczas obrotu stołu wraz z przedmiotem wykonywane są zdjęcia rentgenowskie 2D, na podstawie których powstaje przestrzenny model badanej części. Może być on użyty do oceny wymiarów badanej części, porównania z modelem CAD lub do utworzenia modelu 3D w zakresie tzw. inżynierii odwrotnej (ang. *reverse engineering*) oraz w zakresie defektoskopii do wykrywania i oceny wad materiału. Ze względu na wymogi bezpieczeństwa całe urządzenie jest umieszczone w zamkniętej obudowie zabezpieczającej otoczenie przed promieniami rentgenowskimi. Wykonana jest z materiału polimerowego, a drzwi przesuwne z otworem – ze szkła ołowianego.



Rys. 17. Przykłady elementów możliwych do zmiernia na tomografie Metrotom 800

Fig. 17. Examples of elements possible to measure with the tomograph Metrotom 800

Promieniowanie X nie przekracza dawki 1 μSv/h w odległości 0,05 m od obudowy. Dodatkowe zastosowanie układu tłumienia drgań sprawia, że urządzenie może być zainstalowane praktycznie w dowolnym miejscu zakładu produkcyjnego, uczelni, ośrodka badawczo-rozwojowego itp.

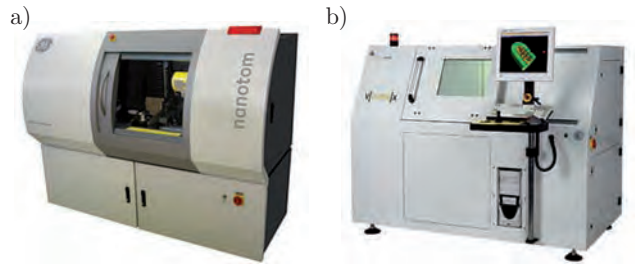
Jak można wywnioskować z przedstawionych parametrów, tomograf ten służy do badania małych elementów o masie do 4 kg, wykonanych głównie z lekkich materiałów, jak aluminium, i z tworzyw sztucznych. Doskonale nadaje się do badania elementów i zespołów elektronicznych, np. do oceny jakości montażu połączeń elektrycznych.

Tomografy firmy C. Zeiss są wyposażone w oprogramowanie Calypso oraz służące do defektoskopii oprogramowanie VGStudio Max. Programy te pozwalają na wykonywanie następujących czynności (rys. 18):



Rys. 18. Funkcje programowe tomografów firmy C. Zeiss

Fig. 18. CT's software features C. Zeiss



Rys. 19. Tomografy firmy GE Sensing & Inspection Technologies: a) nanotom m, b) v|tome|x

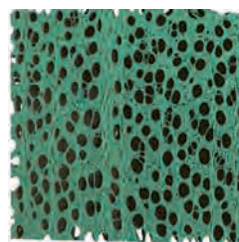
Fig. 19. Tomographs from GE Sensing & Inspection Technologies: a) nanotom m, b) v|tome|x

1. Defektoskopia – wykrywanie nieciągłości materiału (pęknięcia, wtrącenia materiałów, jednorodność materiału, pęcherzyki powietrza itp.).
2. Wyznaczanie wymiarów techniką współrzędnościową (porównanie z modelem CAD oraz inżynieria odwrotna).
3. Badanie wnętrza przedmiotu, np. dla oceny jakości montażu, w tym połączeń elektrycznych.

**Phoenix|X-ray** jest linią produktów firmy GE Sensing & Inspection Technologies koncernu General Electric [11]. Powstała pod koniec lat 90. XX w. w Wunstorf w Niemczech, gdzie do dziś mieści się jej główna siedziba i oddziały: produkcji oraz badań i rozwoju.

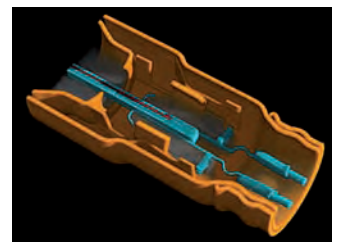
Firma ta oferuje siedem rodzajów tomografów grupy micro- i nanofocus oraz siedem z grupy podstawowej o nazwach nanotom m, nanotom s, v|tome|x L240, v|tome|x L300, v|tome|x L450, v|tome|xs, i v|tome|xm (rys. 19).

Tomograf **nanotom m** jest wyposażony w lampę rtg o napięciu 180 kV i mocy 15 W (lampa typu otwartego) i może mierzyć drobne przedmioty o masie do 3 kg wykonanych głównie z tworzywa i materiałów lekkich o maksymal-



Rys. 20. Defektoskopia elementu z widocznymi wtrąceniami miedzi

Fig. 20. Flaw detection of an element with visible inclusions of copper



Rys. 21. Widok wyniku montażu sondy lambda

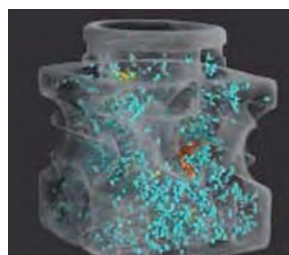
Fig. 21. View of the lambda probe mounting

malnych wymiarach: x = 250 mm, średnica – 240 mm. Odległość ogniskowa wynosi 150–600 mm, minimalny rozmiar voxela – 0,3 μm, najmniejszy rozmiar wykrywanego wtrącenia – 0,2 μm. Geometryczne powiększenie (3D) wynosi od 1,5 do 300 razy. Tomograf o masie 1900 kg ma rozmiary 1,98×1,6×0,9 m. Promieniowanie X nie przekracza dawki 1 μSv/h w odległości 10 cm od obudowy. Tomograf wyposażony jest w oprogramowanie o nazwie datos|x2. Możliwości tomografu w zakresie defektoskopii pokazano na rys. 20 (przykład obrazu 3D cząstek miedzi w kawałku drewna). Na-

tomiast na rys. 21 pokazano sondę lambda – widoczne są spoiny, połączenia zatraskowe, geometryczne ustawienie sondy oraz stan czujników ceramicznych.

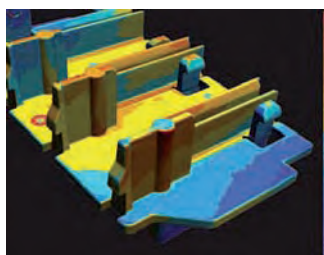
Tomograf **v|tome|x**s (rys.19b) jest wyposażony w kombinację dwóch lamp typu otwartego, a mianowicie w lampę rtg typu mikrofokus o napięciu 240 kV i mocy 320 W oraz w lampę 180 kV i mocy 15 W. Tomograf może mierzyć przedmioty o masie do 10 kg o maksymalnych wymiarach:  $x=420$  mm i średnicy 135 mm. Geometryczne powiększenie dla 2D wynosi od 1,46 do 180 razy i dla 3D od 1,46 do 100 razy. Tomograf o masie 2900 kg ma rozmiary  $2,33 \times 1,69 \times 1,48$  m. Promieniowanie X nie przekracza dawki  $1 \mu\text{Sv/h}$  w odległości 10 cm od obudowy. Tomograf wyposażony jest w oprogramowanie o nazwie Phoenix datos|x2 CT oraz x|act uAXI.

Na rys. 22 i 23 pokazano przykłady wyników badań elementów. Na rys. 22 przedstawiony jest widok 3D odlewu aluminiowego z widocznymi wtrąceniami, a na rys. 23 widok elementu 3D z odchyłkami od wymiaru nominalnego z zaznaczonymi kolorami, w zależności od wartości odchyłki.



**Rys. 22.** Wizualizacja ubytków w odlewie aluminiowym

**Fig. 22.** Visualization of defects in cast aluminum



**Rys. 23.** Widok wyników pomiaru elementu na tle wprowadzonego modelu CAD

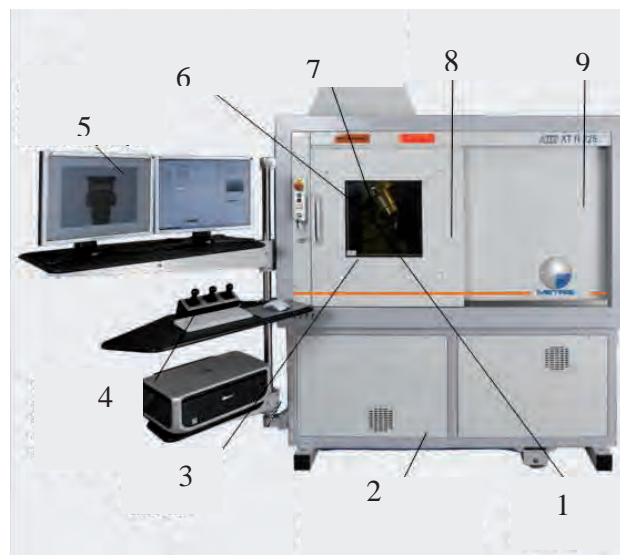
**Fig. 23.** View of the results of measurement of the item placed on the CAD model

Odchyłki te są podane względem wymiarów nominalnych, jakie wniósł wprowadzony do komputera model CAD. Na podziałce z prawej strony można odczytać wartości odchyłek w zależności od koloru powierzchni obrazu przedmiotu.

Firma **Nikon Metrology** [12] oferuje łącznie siedem podstawowych modeli tomografów przemysłowych o symbolach XT H 225, z odmianą XT H 225/350 LC do dużych elementów, XT H 450 do łopatek turbin i odlewów i trzy rodzaje dla potrzeb elektroniki XT V 130, XT V 160R.

Tomograf **XT H 225** (rys. 24) jest wyposażony w otwartą lampę 6,7 typu ultra focus o napięciu 225 kV i mocy 225 W. Ma rozmiary  $1,773 \times 0,935 \times 1,785$  m i masę 2 500 kg. Może badać przedmioty o masie do 15 kg. Przestrzeń pomiarowa 3 wynosi: X do 200 mm, Y do 300 mm i Z do 610 mm. Obrotowy stół pomiarowy ma możliwość pochylania o  $30^\circ$ . Wyposażony jest w detektor panelowy Varian 2520 umiejscowiony w prawej części kabiny 9. Geometryczne powiększenie wynosi  $> 150$  razy. Rozmiar plamki promieniowania (ogniskowa) wynosi  $3 \mu\text{m}$ . Istnieje możliwość wykrywania wad materiału o wymiarach wynoszących nawet  $1 \mu\text{m}$ .

Tomograf wyposażony jest w pełni programowalny układ przesuwany i obrotowy, zamontowany w części kabiny oznaczonej cyfrą 8. Producent określa konstrukcję kabiny 1 jako ergonomiczną. Elektronika i układy chłodzące zainstalowane są w dolnej części tomografu 2 o budowie kompaktowej.

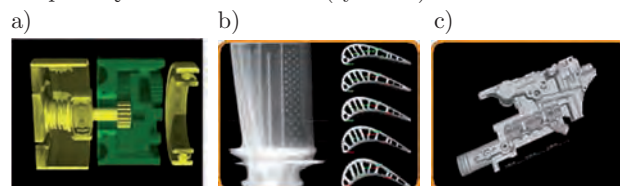


**Rys. 24.** Widok tomografu XT H 225 firmy Nikon Metrology

**Fig. 24.** View tomograph XT H 225 Nikon Metrology

Tomograf jest wyposażony w podwójny wyświetlacz 5 do jednoczesnego pomiaru i analizy w czasie rzeczywistym oraz w joystick 4 do nawigacji wygenerowanym obrazem. Oprogramowanie XT Software Suite umożliwia wykrywanie błędów i analizę oraz kontrolę montażu złożonych mechanizmów, pomiary wielkości geometrycznych, w tym wewnętrznych elementów, tworzenie modelu CAD w ramach inżynierii odwrotnej, porównanie wymiarów z modelem CAD, zaawansowane badania materiału pod kątem analizy uszkodzeń, w tym analizę porowatości analizę struktur biologicznych, cyfrową archiwizację modeli itp.

Na rys. 25 przedstawiono przykłady przedmiotów badanych za pomocą tomografu XT H 225: skrzynię przekładniową, w której oceniana jest jakość montażu (rys. 25a), łopatki turbiny badane pod względem wymiarów oraz wad materiału (rys. 25b), a także odlewany element, analizowany głównie pod kątem wad materiału (rys. 25c).



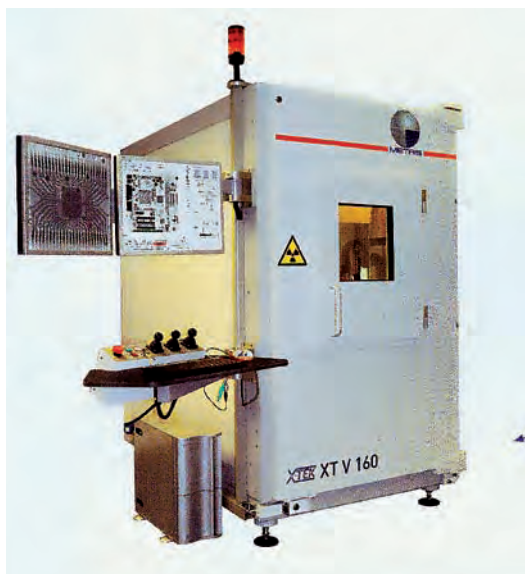
**Rys. 25.** Przykłady pomiarów i badań za pomocą tomografu XT H 225

**Fig. 25.** Examples of measurements and tests with CT XT H 225

Tomograf **XT V 160** (rys. 26) służy, podobnie jak tomograf XT V 130, do badania i pomiarów elementów i zespołów elektronicznych.

Tomograf XT V 160 wyposażony jest w lampę otwartą o napięciu 160 V i maksymalnej mocy 20 W. Ma wymiary  $0,93 \times 2,231 \times 1,975$  m i masę 1935 kg. Może badać przedmioty o masie do 5 kg. Przestrzeń pomiarowa wynosi  $355 \times 405$  mm. Obrotowy stół pomiarowy może być pochylany o  $60^\circ$ . Geometryczne powiększenie osiąga wartość  $2 \times 2400$ . Wielkość plamki promieniowania (ogniskowa) wynosi  $1 \mu\text{m}$ . Istnieje możliwość wykrywania wad materiału o wymiarach dochodzących do  $500 \text{ nm}$ . Tomograf wyposażony jest w panel

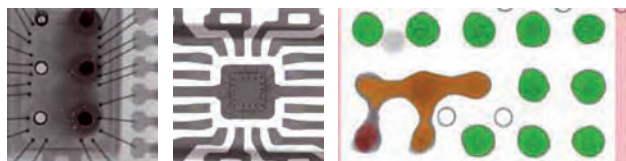




**Rys. 26.** Tomograf CT o symbolu XT V 160 firmy Nikon Metrology  
**Fig. 26.** XT V 160 Nikon Metrology CT tomograph

detektorów Varian 1313 lub opcjonalnie 2520. Promienowanie X nie przekracza dawki  $1 \mu\text{Sv/h}$  w odległości 5 cm od obudowy.

Tomograf umożliwia wykrywanie wad montażu zespołów elektronicznych, szczególnie jakości ścieżek i ich zvarcia, mostkowania, nadmiaru lutu, a także wykrywanie porowatości itp. Przykłady badanych zespołów elektronicznych zostały przedstawione na rys. 27.



**Rys. 27.** Przykłady badanych układów elektronicznych – jakości połączeń, wykrywania nadmiaru lutu itp.

**Fig. 27.** Examples of investigated electronic systems – quality of joints, detection of excess solder etc.

Opcjonalnie może być zainstalowany czytnik kodów kreskowych do rozpoznawania próbek w seryjnym wykonywaniu pomiarów przy zainstalowanym podajniku.

## Podsumowanie

W artykule dokonano krótkiego przeglądu tomografów z podaniem ważniejszych parametrów, funkcji oraz możliwości pomiarowych. Nie wszystkie aspekty tomografów mogły zostać uwzględnione, np. zagadnienie dokładności pomiaru. Producenci tomografów deklarują, że dopuszczalny błąd graniczny wynosi  $4\text{--}9 \mu\text{m}$  z doliczeniem części zależnej od długości mierzonego elementu. Zwykle podana jest zależność o podobnej jak dla współrzędnościowych maszyn pomiarowych strukturze, np. zapis dla tomografu Metrotom 800 jest sformułowany następująco:

$$\text{MPE}_E = (4,5 + L/50) \mu\text{m}$$

gdzie: L – długość mierzona w mm.

Osobnym zagadnieniem jest wyznaczanie dokładności tomografu, szczególnie w procesie jego kalibracji. Jak dotąd nie ma normy ISO, ale w 2009 r. stowarzyszenia VDI/VDE 2630 opracowały wytyczne [9], zgodnie z którymi dokładność tomografów komputerowych CT charakteryzowane są przez następujące cztery grupy parametrów:

1. Parametr związany z błędem pomiaru długości –  $E$ ,
2. Parametry związane z błędem skanowania –  $PF$ ,  $PS$ ,
3. Parametry określające zależności wymiarowo-materiałowe –  $GS$ ,  $GF$ ,  $GG$ ,
4. Parametr określający rozdzielczość –  $Dg$ .

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

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

Tomografia komputerowa CT ma szerokie zastosowanie w pomiarach i kontroli obiektów mechanicznych, jak i elektronicznych. Jej cechą jest uniwersalność, ponieważ poza wyznaczaniem wymiarów pozwala na zbadanie struktury materiału pod względem geometrycznym. Umożliwia wykrycie nieciągłości materiału i różnego rodzaju wtrąceń innych materiałów oraz ocenę porowatości. W wyznaczaniu wymiarów technika ta jest porównywalna pod względem dokładności z klasyczną techniką wykonywaną za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych [4, 5], ma też dodatkowe zalety:

- możliwość wyznaczania wymiarów wewnętrznych, np. grubości ścianek przedmiotów korpusowych, a także – przez penetrację wewnątrz obiektu – ocenę drożności różnego rodzaju kanałów i jakości połączeń,
- uzyskiwanie obrazów wewnętrznych dla oceny jakości montażu zarówno zespołów mechanicznych, jak i elektronicznych.

W przypadku porównywania z modelem CAD, istnieje możliwość uzyskiwania informacji o odchyłkach od wymiaru nominalnego, zarówno na plus, jak i na minus dla całych powierzchni przedmiotu, a nie tylko odchyłek w wymiarze punktowym.

Tomografia komputerowa CT przebojem wdziera się do przemysłu i do ośrodków badawczych, zwłaszcza w zakresie inżynierii materiałowej i elektroniki, np. w badaniach struktury geometrycznej kompozytów i różnego rodzaju stopów [6,7] oraz jakości połączeń zespołów elektronicznych. Prowadzone są badania nie tylko w odniesieniu do wyrobów przemysłowych, lecz także medycznych. Te drugie wiążą się zarówno z archeologią i paleontologią (np. analiza struktur kostnych), jak również z badaniami nad częściami metalowymi i komponentami z różnych materiałów na protezy oraz części stawów biodrowych i kolanowych [8].

## Bibliografia

1. Jezierski G.: *Radiografia przemysłowa*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
2. Cierniak R.: *Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2005.

3. Kielczyk J. : *Radiografia przemysłowa*, Wydawnictwo Gamma, Warszawa 2006.
4. Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
5. Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych*, WNT, Warszawa 2004.
6. Bartscher M., Hilpert U., Goebbels J., Weidemann G.: *Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements*, Annals of the CIRP, Elsevier, vol. 56, (1) 2007, 495–498.
7. Hiller J., Kasperl S., Hilpert U., Bartscher M.: *Coordinate Measuring with Industrial X-Ray Computed Tomography*, Technisches Messen, vol. 74, no. 11, 2007, 553–564.
8. Ryniewicz A.: *Accuracy assessment of shape mapping using Computer Tomography. Metrology and Measuring Systems*, Quarterly of Polish Academy of Sciences, vol. 17, no. 3, 2010, 482–491.
9. VDI/VDE 2630. Blatt 1.3: *Computertomografie in der dimensionalen Messtechnik*, Düsseldorf 2009.

#### Adresy internetowe

10. Carl Zeiss Sp.z o.o. Segment IMT (Warszawa) [www.zeiss.pl].
11. GE Sensing & Inspection Technologies (Niemcy) [www.phoenix-xray.com].
12. Nikon Metrology Europe NV Leuven (Belgia) [www.nikonmetrology.com]. ■

#### X-ray computed tomography for industrial tasks

**Abstract:** This paper presents the latest generation of measuring devices being introduced into the industry and research units, namely, computed tomography CT. The essence of tomography measurements, principles of operation and construction of scanners, their functions and software are described. Then presents several examples of applications in determining the geometrical dimensions of both the CAD model and creating a model for reverse engineering are presented. It also presents examples of flaw detection in revealing of defects in the material.

**Keywords:** computed tomography CT, detector, model CAD, X-rays radiations, flaw detection, x-ray tube, reverse engineering

#### prof. zw. dr inż. Eugeniusz Ratajczyk

Związany z Politechniką Warszawską i Wyższą Szkołą Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Był dziekan Wydziału Mechatroniki PW (1996-2002), członek Rady Nauki przy MNiSW – 2 kadencje. Honorowy przewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN. Zajmuje się metrologią techniczną, a szczególnie współrzędnościową techniką pomiarową oraz tomografią przemysłową.

e-mail: erat@mchtr.pw.edu.pl



## Sterowanie w automatyce portal branżowy



- Aktualności z branży • Pliki • Giełda
- Katalog firm • Baza wiedzy • Praca
- Kalendarz imprez • Kursy • Forum

### Wyślij zapytanie ofertowe

**i wygraj  
pendrive**



### Reklama Twojej firmy od



**490 zł.  
netto za rok**

ponad  
2500 klientów  
czekających na  
Twoją ofertę

REKLAMA