

## MATERIAL DENSITY CONSIDERATION ON THE POSSIBILITY OF ENGINE PARTS IMAGING WITH COMPUTED TOMOGRAPHY

Tadeusz Markowski, Olimpia Markowska, Sławomir Miechowicz

Rzeszów University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautic  
Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Poland  
tel.: +48 17 8651642, fax.: +48 17 8651150  
e-mail: tmarkow@prz.edu.pl  
e-mail: olimpia.markowska@wp.pl  
e-mail: smiechow@prz.edu.pl

### Abstract

The article presents the possibility of data acquisition and processing of the gear-wheels with different densities and complex shape geometry image recognition with Computed Tomography (CT). Reverse Engineering (RE) techniques allow for obtaining the geometry of the real parts and the whole machineries. It is especially useful if CAD data of the parts doesn't exist. The reason may be to fabricate a spare part or to create a CAD model for further development. It can be applied for tests, quality verification and further development of the product. Computed Tomography, as one of RE techniques, allows for accurate and precise part measurements, enabling description of internal and external structures. It is one of the most significant tools for nondestructive testing of materials, quality assurance and reengineering. The only limitations are the part thickness, density, and the power of CT x-ray tube. The article presents problems of data acquisition with the imaging of engine parts, especially gear-wheels, with different density. The influence of part density and volume parameters on the quality of imaging of the CT measure technique in this article is presented. The specific fields of interest could be a machinery failure analysis, inspection of assemblies, investigations of material properties changes as density distribution, etc. The CT data for the analysis was preprocessed with Able 3D Doctor and Catia V5 software.

**Keywords:** transport, Reverse Engineering, modelling, Computed Tomography, CAD

## WPLYW RODZAJU MATERIAŁU I GĘSTOŚCI NA DOKŁADNOŚĆ OBRAZOWANIA CZĘŚCI MASZYN Z WYKORZYSTANIEM TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

### Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości akwizycji i przetwarzania danych kół zębatach o różnych gęstościach oraz obrazowania skomplikowanych geometrycznie części maszyn z wykorzystaniem tomografii komputerowej (TK). Inżynieria odwrotna (RE) umożliwia otrzymanie geometrii rzeczywistych obiektów, części maszyn i całych urządzeń. Jest szczególnie użyteczna w przypadku, kiedy dane CAD danej części nie istnieją. Może być ona wykorzystana do wytworzenia części zamiennej lub modelu CAD do dalszych badań rozwojowych. Można ją również zastosować do testów, kontroli jakości oraz w procesie rozwoju gotowego produktu. Tomografia komputerowa jako jedna z technik inżynierii odwrotnej, umożliwia dokładne pomiary części maszyn, geometryczny opis wewnętrznych i zewnętrznych cech obiektu. Jest jednym z podstawowych narzędzi w badaniach nieniszczących, badaniach materiałów, dla zapewnienia jakości oraz inżynierii odtworzeniowej. Jedyne ograniczenia metody są grubość badanego obiektu, jego gęstość oraz moc źródła promieniowania rentgenowskiego. Artykuł prezentuje problemy związane z akwizycją danych oraz obrazowania elementów silników, części maszyn ze szczególnym uwzględnieniem kół zębatach o różnej gęstości. Przedstawiono również wpływ gęstości (rodzaju materiału) oraz objętości na jakość obrazowania w badaniach części maszyn metodą tomografii komputerowej. Do obszarów zastosowań należy zaliczyć badania niezawodności elementów maszyn, diagnozowanie uszkodzeń, pęknięć, zużycia części maszyn z elementami wewnętrznymi, jak kanały, komory, analiza pracy złożonych mechanizmów itp. Obróbka danych tomograficznych do badań została przeprowadzona przy użyciu pakietu oprogramowania Able Corp. 3DDoctor oraz Catia V5.

**Słowa kluczowe:** transport, inżynieria odwrotna, modelowanie, tomografia komputerowa, CAD

## 1. Wstęp

Zastosowanie nowoczesnych technik pomiarowych oraz obliczeniowych umożliwia uzyskanie nowych jakościowo wyników badań, modeli numerycznych testowanych obiektów oraz symulacji zachodzących procesów fizycznych. Bardzo przydatnym narzędziem na polu symulacji i analizy numerycznej jest **inżynieria odwrotna**.

Inżynieria odwrotna (*ang. Reverse Engineering-RE*) znajduje coraz szersze zastosowanie w dziedzinach związanych z produkcją i eksploatacją silników spalinowych oraz układów napędowych. Techniki inżynierii odwrotnej umożliwiają określenie geometrii obiektu rzeczywistego, części maszyn, od modelu prototypu do gotowego produktu na każdym etapie eksploatacji. Modele elementów uzyskane metodami inżynierii odwrotnej na podstawie rzeczywistych części maszyn czy urządzeń, uwzględniają rzeczywiste warunki związane z eksploatacją. Uwzględnienie tych czynników w analizie, dzięki modelom tworzonym na bazie eksploatowanych elementów maszyn, pozwala na uzyskanie bardziej dokładnych danych elementu oraz poprawę warunków obsługi i eksploatacji maszyny. Metody inżynierii odwrotnej mogą być szczególnie przydatne w diagnozowaniu uszkodzeń, pęknięć, zużycia części maszyn z elementami wewnętrznymi, jak kanały, komory, itp., złożonych mechanizmów, oraz badań zmian własności materiałów itp.

Dobór odpowiedniej metody akwizycji danych dla potrzeb inżynierii odwrotnej jest szczególnie istotny dla elementów maszyn o złożonych kształtach. Można wyróżnić kilka metod uzyskiwania danych [1], jednak w przypadku części silników z elementami wewnętrznymi, np. komory, kanały dolotowe itp., najbardziej efektywna jest tomografia komputerowa. Główną zaletą tej techniki jest możliwość otrzymania zewnętrznej i wewnętrznej geometrii badanego obiektu z dużą dokładnością [2, 3, 4].

W artykule przedstawiono własne doświadczenia badań metodą tomografii komputerowej typowych elementów, części silników i układów napędowych stosowanych w przemyśle samochodowym i lotniczym wykonanych z różnych materiałów. Przykładowe, wybrane części wykorzystane do badań tomograficznych pokazano na Rys. 1.



Rys. 1. Przykładowe, wybrane części maszyn wykorzystane w badaniach TK  
Fig. 1. An example of tested objects with CT

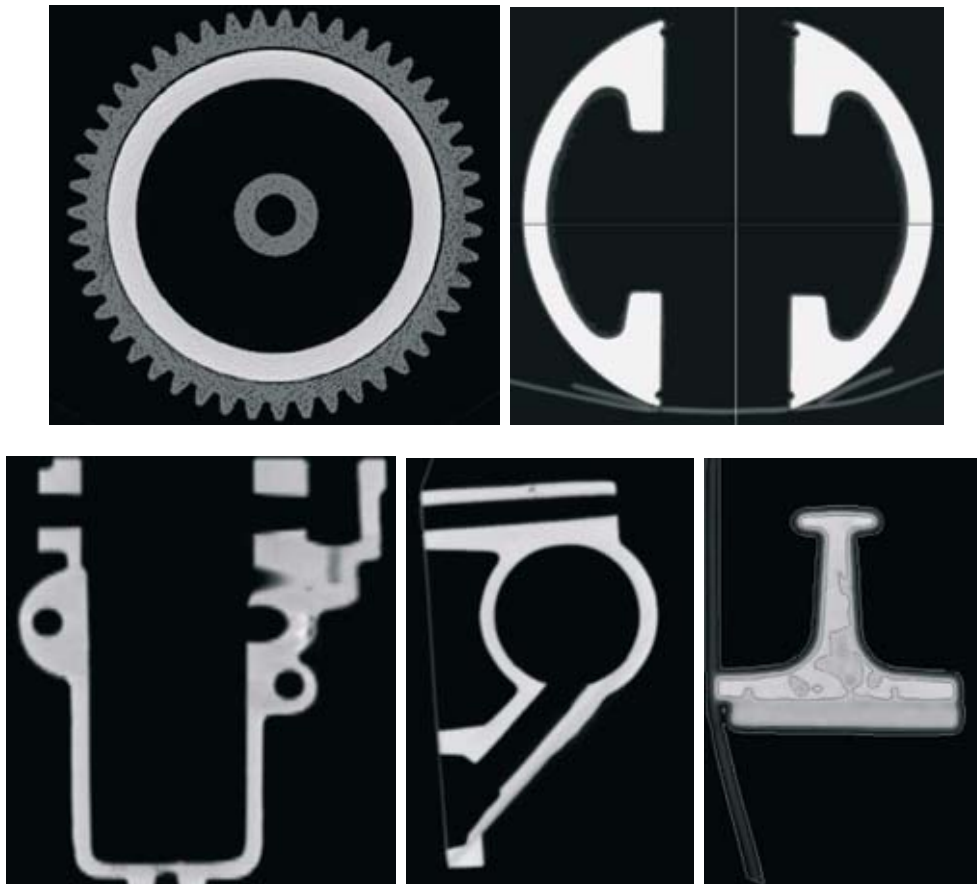
## 2. Akwizycja danych

Wśród technik digitalizacji obiektów trójwymiarowych w zastosowaniach przemysłowych można wyróżnić metody dotykowe i optyczne - do odwzorowywania powierzchni zewnętrznych oraz tomografię komputerową - do odwzorowywania elementów zawierających cechy

wewnętrzne. W zastosowaniach związanych z produkcją i eksploatacją silników spalinowych tomografia komputerowa jest najbardziej odpowiednią metodą. Dane tomograficzne obiektu z postaci rastrowej (Rys. 2) można przetworzyć do trójwymiarowej postaci chmury punktów, a następnie modelu powierzchniowego w formacie STL. Stanowi on format wejściowy do wytworzenia fizycznego modelu wybraną metodą szybkiego prototypowania (*ang. Rapid Prototyping-RP*), a także gotowego elementu maszyny jako części zamiennej np. metodą odlewania próżniowego. Obróbka danych otrzymanych z tomografu poprzez specjalistyczne oprogramowanie umożliwia otrzymanie plików o standardach typowych dla systemów CAD/CAM/CAE [4].

Dane uzyskane przy użyciu inżynierii odwrotnej zawierają informacje o obiekcie rzeczywistym w przeciwieństwie do wirtualnego projektu CAD. Mogą przez to zawierać informacje o warunkach współpracy poszczególnych części maszyny. Na ich podstawie można wykryć ewentualne błędy konstrukcyjne, technologiczne, czy wady materiałowe. Można dzięki temu ograniczyć koszty eksploatacji i napraw krytycznych, bardzo kosztownych elementów maszyny.

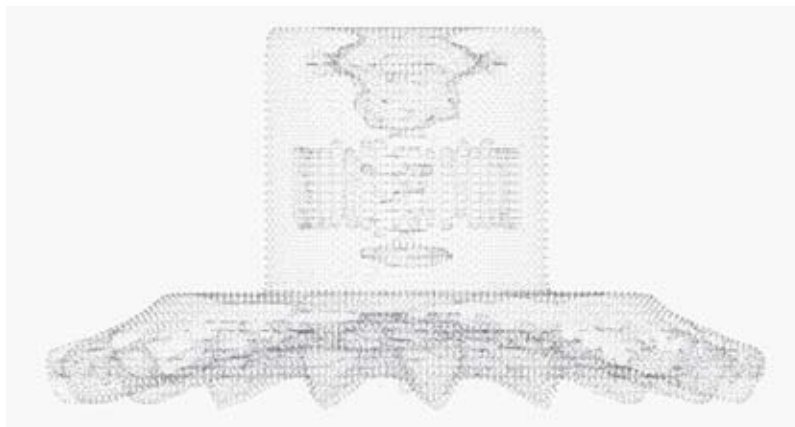
Nie wszystkie elementy maszyn można jednak badać tą metodą. Istotnym ograniczeniem jest wielkość badanego obiektu oraz rodzaj materiału, z jakiego dany element jest zbudowany.



Rys. 2. Obrazy tomograficzne wybranych części maszyn użytych do badań  
Fig. 2. The chosen 2D CT imaging of tested parts

### 3. Przetwarzanie danych

Modele uzyskane przy użyciu inżynierii odwrotnej są bardziej skomplikowane, zawierają więcej elementów i inną strukturę niż modele CAD. W przeciwieństwie bowiem do nich są uzyskiwane metodami dyskretnymi. W wyniku pomiarów technikami optycznymi i dotykowymi można uzyskać w sposób bezpośredni trójwymiarową chmurę punktów (Rys. 3.).



Rys. 3. Trójwymiarowa chmura punktów-dyskretny obraz badanego koła zębatego – liczba punktów ograniczona dla lepszej wizualizacji obiektu

Fig. 3. 3D points cloud as a result of the gear-wheel testing-the number of points limited for visualization reason only

Chmura punktów jest najczęściej stosowanym formatem zapisu danych w technikach RE. Stanowi interfejs do zapisu wektorowego systemów CAD [5]. Format pliku danych zależy od przewidywanego zastosowania modelu. Otrzymany model 3D może służyć do wytworzenia fizycznego elementu jako kopii badanej części wybraną techniką RP. Istnieje również możliwość późniejszego wytworzenia części funkcjonalnej z oryginalnego materiału np. metodą odlewania próżniowego.

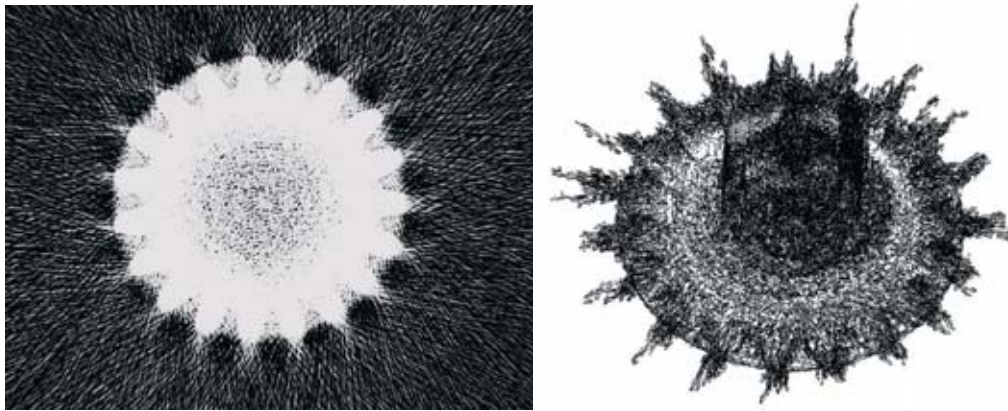
W przypadku tomografii komputerowej dane są uzyskiwane metodą pośrednią. Wynik pomiaru ma postać zbioru obrazów rastrowych. Każdy obraz zawiera informację z pojedynczej warstwy skanowanego obiektu. Składa się ona z macierzy pojedynczych wokseli. Element macierzy stanowi matematyczną interpretację gęstości HU-Housfielda w odniesieniu do skali odcieni szarości obrazu. Jego wartość jest proporcjonalna do współczynnika osłabienia promieniowania rentgenowskiego po przejściu przez badany obiekt [3, 6]. Wygenerowany w trakcie rekonstrukcji warstw zbiór obrazów może być źródłem danych do wizualizacji 3D objętościowej VR (*ang. Volume Rendering-VR*) lub powierzchniowej. Pozwalają one na tym etapie na kontrolę poprawności przeprowadzonego badania. Do uzyskania modelu CAD niezbędna jest transformacja danych do modelu wektorowego. Obróbka cyfrowa obrazu rastrowego pozwala wyodrębnić zbiór punktów stanowiących zarys krawędzi w danym przekroju badanego obiektu.

Rekonstrukcja obrazu 2D wiąże się z oddzieleniem fragmentów obiektu od występujących zniekształceń obrazu, szumu oraz tła. W metodzie warstwowej etap określenia krawędzi obiektu może być połączony z wyznaczeniem konturu wektorowego obiektu. Zabieg ten jest przeprowadzany dla całego zbioru obrazów badanego obiektu. Po opisaniu w procesie segmentacji maski obiektu następuje określenie wokseli brzegowych obiektu w całym zbiorze. Wyliczone współrzędne punktów krawędzi stanowią reprezentację obiektu w postaci chmury punktów. Do wyznaczenia modelu siatkowego konieczne jest określenie powierzchni badanego obiektu. Postać chmury punktów jako zbioru ich współrzędnych XYZ nie definiuje jednoznacznie kształtu elementu. Nie występuje informacja o wzajemnych zależnościach, czy połączeniach punktów. Błędna interpretacja cech powierzchni może wpływać na przydatność modelu do dalszych analiz. Większość dostępnych aplikacji do obróbki chmur punktów nie jest w stanie automatycznie rozpoznać i przyporządkować punktów wewnętrznych i zewnętrznych do odpowiednich powierzchni obiektu [7]. Konieczna jest interwencja operatora, jego znajomość budowy modelu oraz cech powierzchni obiektu. Często występuje więc konieczność wykonania dodatkowych, pomocniczych operacji obliczeniowych. Otrzymany tym sposobem model cechuje duża dokładność wymiarowa.

Największy problem wpływający na dokładność pomiarów w badaniach TK stanowią artefakty, tj. zakłócenia obrazu wynikające z dużej gęstości materiału badanego obiektu (Rys. 4).



Zagadnienie korekcji artefaktów w obrazowaniu części maszyn o dużej gęstości dla potrzeb inżynierii odwrotnej zostało opisane w [6, 8]. Technika pomiaru została opisana w [4]. Na Rys. 2. zostały przedstawione wybrane obrazy rastrowe badanych części maszyn otrzymane przy użyciu wielorzędowego tomografu spiralnego Siemens Sensation 10.

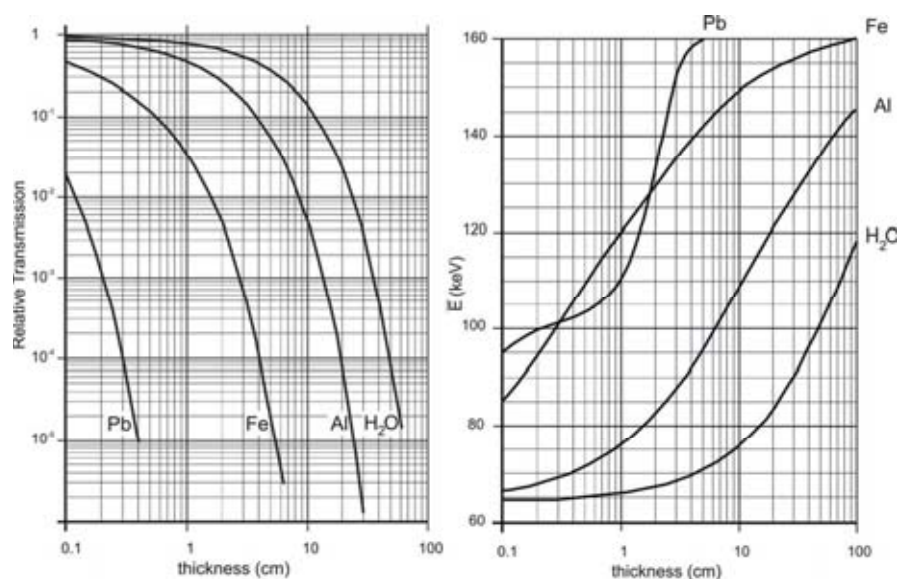


Rys. 4. Problem artefaktów obrazowych w badaniach TK - zniekształcenia obrazu badanego koła zębatego wykonanego ze stali

Fig. 4. CT imaging artefacts of tested gear-wheel made of steel

#### 4. Wpływ materiału badanego elementu na dokładność obrazowania tomograficznego

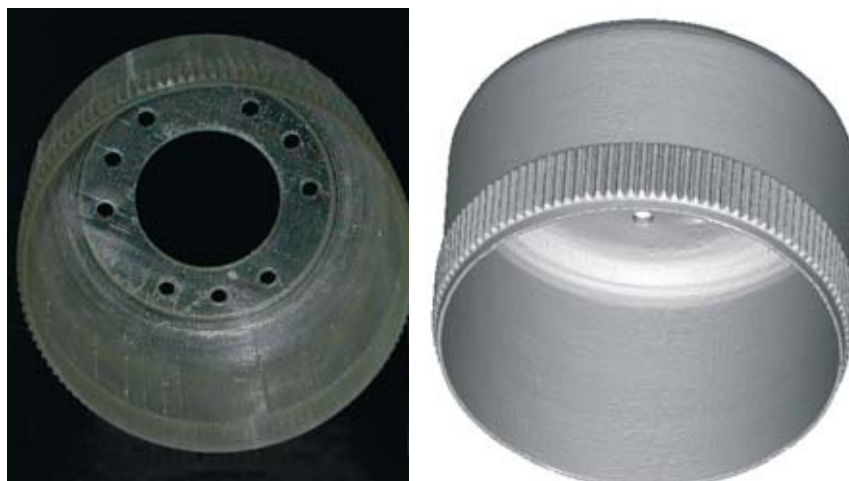
Tomografia komputerowa należy do najbardziej złożonych metod pomiarowych, a wynik pomiaru jest obliczany metodą pośrednią. Z tego też powodu na dokładność pomiaru ma wpływ bardzo wiele czynników [3]. Ze względu na samą istotę pomiarów TK można wyróżnić trzy główne czynniki decydujące o możliwości wykonania badania oraz dokładności obrazowania testowanego obiektu. Należą do nich: napięcie lampy Rtg, grubość warstwy badanego obiektu, oraz rodzaj materiału z jakiego badany obiekt jest wykonany. Napięcie lampy Rtg decyduje o energii wyemitowanej wiązki promieniowania. Na podstawie tego parametru można określić zakres oraz rodzaj możliwych do przeprowadzenia badań dla danego urządzenia pomiarowego. Pozostałe dwa czynniki: grubość oraz rodzaj materiału są ściśle powiązane z badanym obiektem. Przybliżone, orientacyjne zależności doboru tych parametrów zostały przedstawione na Rys. 5.



Rys. 5. Zależności względnej przenikalności promieniowania oraz energii wiązki w funkcji grubości badanego obiektu dla wybranych materiałów

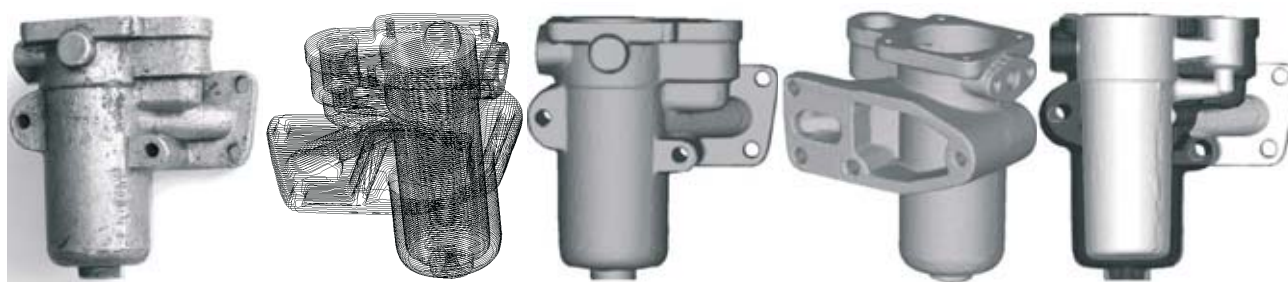
Fig. 5. Relative Transmission and X-ray Energy Emission on the tested object thickness

Na podstawie przeprowadzonych badań dostępnych części maszyn dokonano podziału na obiekty „miękkie”, „średnie” i „twarde”. Do pierwszej grupy zaliczono wszystkie elementy wykonane z tworzyw sztucznych. Dla pomiarów przy napięciu lampy 140 kV, elementów z tworzyw sztucznych, szczególnie kół zębatach, nie występuje ograniczenie wymiarowe (Rys. 5). Nawet największe badane elementy o wymiarach 250x250 mm w płaszczyźnie pomiarowej cechowały się bardzo dużą dokładnością [2, 4]. Obrazowanie części maszyn z tej grupy materiałów nie stanowi problemu. Ograniczeniem jest więc jedynie wielkość przestrzeni pomiarowej urządzenia skanującego. Przykład badania koła zębatego wykonanego z tworzywa sztucznego oraz uzyskany model zostały przedstawione na Rys. 6.



Rys. 6. Badane koło zębate z tworzywa sztucznego oraz wygenerowany model STL na podstawie badania metodą TK  
 Fig. 6. The tested gear-wheel object and a STL model generated based on the CT examination

Do drugiej grupy części maszyn zostały zaliczone elementy wykonane ze stopów aluminium. Ze względu na szerokie zastosowanie materiałów tej grupy w przemyśle samochodowym i lotniczym, badaniom części tej grupy poświęcono szczególną uwagę. Gęstość HU badanych elementów, podobnie jak materiałów grupy pierwszej, również nie stanowiła problemu w badaniach TK z wykorzystaniem standardowego źródła promieniowania 140 kV. Nie zaobserwowano pogorszenia jakości ani występowania artefaktów obrazowych na wybranej grupie modeli. Na podstawie danych literaturowych pogorszenie jakości dla stopów aluminium i takiego napięcia występuje przy grubości obiektu powyżej 400 mm. (Są to dane orientacyjne). Ze względu na brak modeli o podobnych gabarytach warunek ten, nie został jednak sprawdzony. Badane części maszyn charakteryzują się podobną dokładnością do elementów grupy pierwszej. Przykłady badania elementów wykonanych ze stopów aluminium oraz wygenerowane modele 3D zostały przedstawione na Rys. 7, 8, 9.

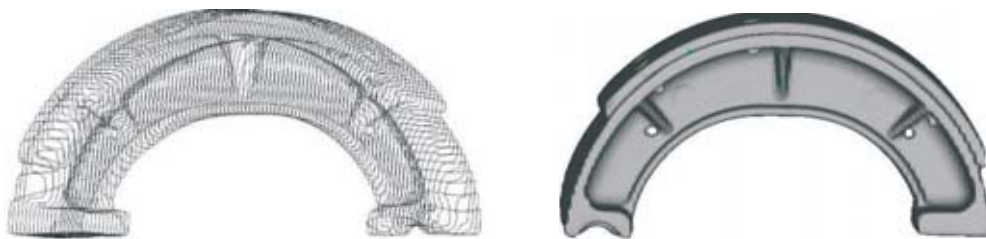


Rys. 7. Obudowa części układu paliwowego silnika spalinowego wykonana ze stopu aluminium (kolejno): obiekt rzeczywisty, model konturowy, model STL-widoki i przekrój, (widoczna budowa wewnętrzna badanego elementu)  
 Fig. 7. The part of fuel system of internal combustion engine made of aluminum alloy: real object, contour model, STL model and STL cross-section



Rys. 8. Tłok silnika spalinowego-wysokoprężnego samochodu ciężarowego (kolejno): obiekt rzeczywisty, model konturowy, model STL - przekrój, (dobrze widoczna budowa wewnętrzna badanego elementu)

Fig. 8. A piston of a truck engine: real object, contour model, STL model cross-section



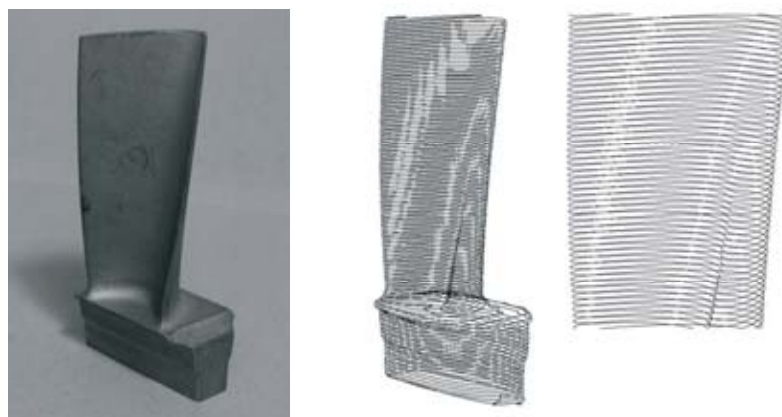
Rys. 9. Element układu hamulcowego: model konturowy, model STL (dobrze widoczna okładzina hamulcowa oraz nity)

Fig. 9. The tested object model data: contour model, STL model



Rys. 10. Koło podatne przekładni falowej: obiekt rzeczywisty, oraz wygenerowany model STL

Fig. 10. A flexible gear-wheel: real object, a STL model



Rys. 11. Łopata silnika turbinowego: obiekt rzeczywisty, model konturowy

Fig. 11. A turbine blade: real object, a contour model



Części maszyn należące do trzeciej grupy materiałów to elementy wykonane ze stali oraz stopów tytanu. Badane części pokazano na Rys. 10, 11. Badanie takich elementów wymaga zastosowania większych energii źródła promieniowania. W tej grupie obrazowanych materiałów występują artefakty obrazowe (Rys. 4). Jest to szczególnie widoczne w przypadku łopatek silników lotniczych wykonanych ze stopów tytanu. W takim przypadku wymagane jest źródło promieniowania o napięciu minimum 450 kV [6]. Dla napięcia 140 kV możliwe jest obrazowanie elementów o niewielkich gabarytach wykonanych ze stali (Rys. 10, 11).

#### 4. Wnioski

- Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej umożliwia dokładne obrazowanie elementów maszyn zarówno ich powierzchni zewnętrznych, jak i przestrzeni wewnętrznych.
- Dla części ze stopów tytanu napięcie lampy rentgenowskiej powinno wynosić powyżej 450 kV.
- Stopy aluminium charakteryzują się relatywnie niską gęstością HU. Pomiar elementów o grubości do 300 mm przy napięciu lampy Rtg 450 kV nie stanowi problemu.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007 - 2009 jako projekt badawczy rozwojowy (R03 021 02). This research work is financed from the funds allotted for science in 2007 - 2009, as a research and development project titled "Developing of innovative gear boxes with a typical teeth" (R03 021 02).

#### Literatura

- [1] Motavalli, S., *Review of Reverse Engineering Approaches*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40/2000, Vol. 35, No. 1-2/2000.
- [2] Urbanik, A., Miechowicz, S., *Przestrzenna analiza dokładności obrazowania tomografu medycznego, Spatial Analysis of CT Accuracy*, Polish Journal of Radiology, Vol. 69, Suppl. 1, 372(319), Mikołajki 2004.
- [3] Markowski, T., Miechowicz, S., *Czynniki wpływające na rozdzielczość przestrzenną CT dla potrzeb Reverse Engineering*, Wyd. Akademii Morskiej w Gdyni, 2005.
- [4] Miechowicz, S., Sobolak, M., *The Efficiency of Utilization of Siemens Sensation 10 CT Scanner for Reverse Engineering*, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej Nr 85/2004, Wrocław 2004.
- [5] Xinming, L., Zhongin, L., Tian, H., Ziping, Z., *A Study of a Reverse Engineering System Based on Vision Sensor for Free-Form Surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40/2001.
- [6] Markowski, T., Miechowicz, S., Markowska, O., *Some aspects of CT data acquisition for Reverse Engineering*, Prace Zachodniego Centrum Akademii Transportu Ukrainy, Lwów, Wydawnictwo "Logos" Lwów 2006.
- [7] Tai, C., Huang, M., *The processing of data points basing on design intent in reverse engineering*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40/2000.
- [8] Yu, et al., *A Segmentation-Based Method for Metal Artifact Reduction technical report Academic Radiology*, Vol 14, No. 4, April 2007.