

Porównanie wyników badań metrologicznych uzyskanych za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej i skanera optycznego 3D

Comparison of the results of metrological tests obtained from X-ray computed tomography and optical 3D scanner

Adam Tchórz¹, Andrzej Gil²

¹*Instytut Odlewnictwa, Zespół Laboratoriów Badawczych, Laboratorium Badań Nieniszczących, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

²*Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

¹*Foundry Research Institute, Complex of Accredited Research Laboratories, Laboratory for Non-destructive Testing, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

²*Foundry Research Institute, Centre of Designing and Prototyping, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

E-mail: adam.tchorz@iod.krakow.pl

Streszczenie

Abstract

Istotnym czynnikiem decydującym o jakości wyrobów jest wprowadzenie nowych metod w dziedzinie metrologii technicznej. W pracy przedstawiono metodykę analizy badań metrologicznych uzyskanych za pomocą tomografu komputerowego i skanera optycznego 3D. Urządzenia te umożliwiły uzyskanie wirtualnych obiektów oraz pozwoliły na przeprowadzenie trójwymiarowych analiz przestrzennych. Przedstawiono zasadę działania tych urządzeń oraz przeanalizowano ich możliwości na przykładzie wytypowanych odlewów. Wyniki badań przedstawiono za pomocą określonych wymiarów oraz mapy kolorów na powierzchni modelu. Dokonano oceny dokładności pomiarów w poszczególnych metodach.

The launch of new methods in the technical metrology area is a material factor determining the quality of the products. The paper presents the methodology of analysis of metrological tests conducted with the use of computed tomography and an optical 3D scanner. These devices allowed us to obtain virtual objects and conduct 3D spatial analyses. The paper presents the operating principle of these devices and analyses their capabilities based on selected castings. The results of the tests are presented with the support of determined dimensions and colour maps on the model surface. The accuracy of measurements in individual methods was assessed.

Słowa kluczowe: metrologia 3D, skanowanie 3D, rentgenowska tomografia komputerowa (X-ray CT), optyczny skaner 3D

Keywords: metrology 3D, 3D scanning, X-ray computed tomography (X-ray CT), optical 3D scanner

1. Wprowadzenie

1. Introduction

Znaczący rozwój technologiczny, a przy tym coraz większe wymagania techniczne stwarzają konieczność stosowania coraz to dokładniejszych technik pomiarowych. Postęp w zaawansowanych technikach pomiarowych umożliwia tworzenie nowych metod diagnostycznych w badaniach odpowiedzialnych odlewów czy wyrobów konstrukcyjnych, dlatego też szczególną

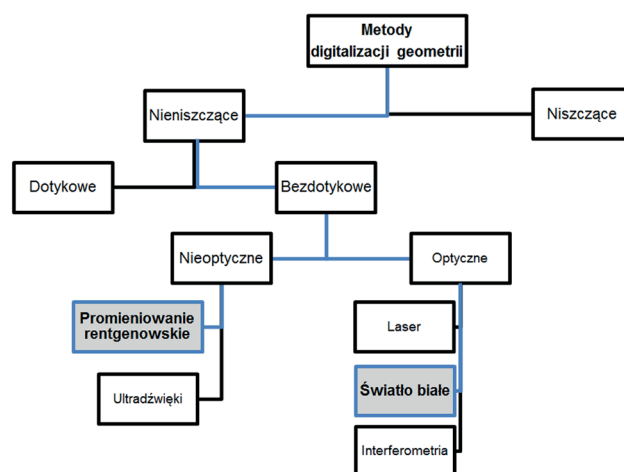
Significant technological development accompanied by increasing technical requirements create the need for more and more accurate measurement methods. Progress in advanced measurement technologies allows the creation of new diagnostic methods in responsible tests of the castings or constructional products and thus special attention should be paid to

uwagę należy zwrócić na urządzenia metrologiczne, które odgrywają dużą rolę w nowoczesnej diagnostyce obiektów fizycznych.

Metrologia jest nauką, która rozwiązuje problemy dotyczące pomiarów z niemal wszystkich dziedzin nauk: technicznych, środowiskowych i medycznych [1]. W celu prawidłowego rozpoznania wymiarów obiektu, należy poznać ich zewnętrzną lub często też wewnętrzną strukturę oraz parametry geometryczne. Dzięki współczesnym maszynom pomiarowym możliwe jest precyzyjne określenie zewnętrznego kształtu i wymiarów mierzonego obiektu oraz zarejestrowanie wyników w postaci zbioru danych. Na podstawie uzyskanych wyników użytkownik może uzyskać wirtualny model 3D i dokonać na nim odpowiednich operacji. Urządzenia tego typu można podzielić na kilka kategorii, np. w zależności od: sposobu pomiaru, rodzaju uzyskiwanych danych, stopnia automatyzacji pomiaru, rodzaju wzajemnego oddziaływania urządzenia pomiarowego z obiektem itd. Podział niektórych metod digitalizacji geometrii przedstawiony został na [rysunku 1](#).

metrological devices, which play an important role in the modern diagnostics of physical objects.

Metrology is a science, which solves the measurement related problems in nearly all scientific domains: technical, environmental and medical [1]. The external or frequently the internal structure and geometric parameters have to be studied to correctly recognise the dimensions of an object. Modern measurement equipment allows us to precisely determine the external shape and dimensions of the measured object and record the results in the form of a data set. The obtained results enable the user to obtain a virtual 3D model and perform respective operations on this model. This type of equipment can be divided into a few categories, e.g. depending on the measurement method, type of obtained data, degree of measurement automation, type of interaction between the measurement device and the object, etc. The division of some methods of geometry digitalisation are presented in [Figure 1](#).



Rys. 1. Schemat podziału metod digitalizacji geometrii (wyróżnione metody zostały użyte w badaniach) [2]

Fig. 1. Division diagram of geometry digitalisation methods (the highlighted methods were used in the tests) [2]

Do badań zostały wykorzystane metody pozwalające na digitalizację geometrii techniką nieniszczącą i bezdotykową: metoda rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) oraz metoda optycznego skanowania 3D światłem białym.

W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane metody, które pozwalają na wygenerowanie trójwymiarowego modelu wirtualnego oraz poddanie go analizie pomiarowej.

2. Materiał i metodyka badań

Do badań wytypowano dwa detale ze stopu aluminium o różnym stopniu skomplikowania geometrii obiektu fizycznego. Przy wyborze brano pod uwagę

The tests were conducted with the use of methods enabling the geometry digitalisation under non-destructive and contactless methods: X-ray computed tomography (CT) method and optical 3D scanning with white light method.

This paper presents selected methods enabling the generation of a 3D virtual model and its subsequent measurement analysis.

2. Material and test methodology

Two details from aluminium alloy with various degrees of complication of physical object geometry were selected for the tests. The selection process con-

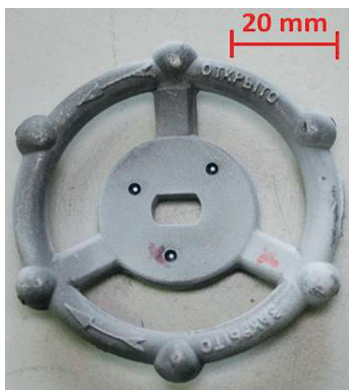
możliwości wytypowanych urządzeń stosowanych w metrologii 3D i to, że stają się coraz bardziej skutecznymi narzędziami w wielu zadaniach monitoringu procesów produkcji, np. produkcja odlewów precyzyjnych odpowiedzialnych części maszyn. Kryteria te były niezwykle istotne również ze względu na metodę CT, która umożliwia nie tylko odwzorowanie skomplikowanych kształtów bryły, ale też jej wewnętrznej struktury. Zastosowanie metody CT oraz skanowania optycznego 3D zwiększa możliwości badań dla tego typu obszarów obiektów fizycznych. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono próbki wytapowane do badań.

sidered the capabilities of the selected devices used in 3D metrology and the fact that they are becoming more and more effective tools in many production process monitoring tasks, e.g. production of precise castings of responsible machine parts. These criteria were very important also due to the CT method, which allows both mapping of the complicated shapes of the body and its internal structure. The CT and 3D optical scanning methods increased the potential of testing these types of areas of physical objects. Figures 2 and 3 present the samples selected for the tests.



Rys. 2. Próbka nr 1 wytapowana do badań

Fig. 2. Sample no. 1 selected for the tests



Rys. 3. Próbka nr 2 wytapowana do badań

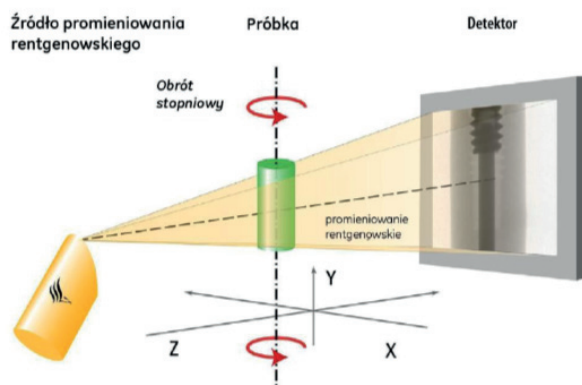
Fig. 3. Sample no. 2 selected for the tests

Metoda rentgenowskiej tomografii komputerowej jest jedną z metod, która została wykorzystana do wykonania modelu wirtualnego. Metoda ta charakteryzuje się dużą rozdzielczością, przez co umożliwia bardzo dokładne odwzorowanie złożonej powierzchni badanego obiektu. Dodatkowo pozwala na wnikienie w strukturę materiału i zbadanie poszczególnych jego warstw.

Zasada tomografii komputerowej oparta jest na rejestrowaniu przez detektor stopnia osłabienia wiązki promieniowania przechodzącej warstwowo przez badany obiekt, przy czym każda warstwa jest skanowana

X-ray computed tomography method is one of the methods applied to create a virtual model. This method is characterised by a high resolution, which in turn enables very accurate mapping of a complex surface of the analysed object. It additionally allows infiltrating the structure of the material and studying its individual layers.

The computed tomography method is based on detectors recording the degree of deflection of X-ray beams passing in layers through the studied object, while each layer is scanned by an X-ray lamp-detector system from many angles (Fig. 4).



Rys. 4. Schemat rejestracji obrazu za pomocą rentgenowskiej tomografii [3]

Fig. 4. Image recording diagram with the use of X-ray computed tomography [3]

przez układ lampa rentgenowska – detektor pod wieloma kątami (rys. 4).

Tworzenie obrazu zaczyna się od wykonania serii zdjęć dwuwymiarowych. Seria zdjęć jest wykonywana podczas obrotu próbki o 360° w polu widzenia o kątowych przyrostach $0,25 \dots 0,5^\circ$ co jeden skok. Zdjęcia te zawierają informacje o pozycji i gęstości obiektu. Zgromadzone dane są następnie wykorzystywane do numerycznej rekonstrukcji objętościowej. Rezultatem badań jest wizualizacja 3D badanego obiektu. Możliwe jest też „krojenie” segmentowe obrazu i podgląd w każdym kierunku. Rozdzielczość metody zależy głównie od założonej szerokości skanowanych warstw, a ta z kolei, obok wielkości obiektu i właściwości fizycznych materiału obiektu, wpływa na czas skanowania [4,5,6].

Badania zostały wykonane na stanowisku do badań nieniszczących za pomocą tomografii komputerowej typu ν tomex I-450. Wielkość woksela wynosiła $65 \mu\text{m}$. Woksel (*volumetric element – voxel*) jest sześcianem będącym elementarną częścią przestrzeni 3D. Skanowanie za pomocą CT umożliwiło przeniesienie do komputera trójwymiarowej geometrii obiektów fizycznych. Pozwoliło to ocenić jakość odwzorowanej geometrii oraz dało możliwość naniesienia korekty związanej z wyodrębnieniem tylko tych elementów, które były podstawą dla opracowania modelu w postaci siatki trójkątów (STL). Wszystkie operacje związane z obróbką danych z CT były wykonywane za pomocą oprogramowania ν x-reconstruction oraz VGStudio Max 2.0.

Oprogramowanie ν x-reconstruction pozwoliło na akwizycję danych z tomografu oraz przetworzenie ich na plik objętościowy (składający się z wokseli), zawierający informacje o wewnętrznej strukturze i geometrii obiektu. Docelowym zadaniem programu VGStudio Max była natomiast konwersja danych z CT do bardziej użytecznej reprezentacji w postaci siatki trójkątów z możliwie najlepszą dokładnością.

The creation of the image starts with taking a series of two-dimensional photos. The series of photos is taken during the rotation of the sample by 360° in the field of vision with angular increments $0.25 \dots 0.5^\circ$ every stroke. These photos contain information on the position and density of the object. The collected data is subsequently used for digital volumetric reconstruction. This ultimately results in 3D visualisation of the tested object. The slice segmentation of the image and preview in any direction is possible as well. The resolution of the method depends mainly on the assumed width of the scanned layers and this in turn – in addition to the size of the object and physical properties of the material – affects the scanning time [4,5,6].

The tests were conducted with the support of a non-destructive testing station under tomography method of type ν tomex I-450. Voxel (volumetric element) was $65 \mu\text{m}$. Voxel is a cube being an elementary part of 3D space. CT scanning allowed transferring three-dimensional geometry of physical objects into the computer. This in turn allowed assess to the quality of mapped geometry and to make adjustments related to separation of these elements only, which formed the basis for the development of the model in the form of triangular network (STL) format. All operations related to CT data processing were performed with the use of ν x-reconstruction and VGStudio Max 2.0 software.

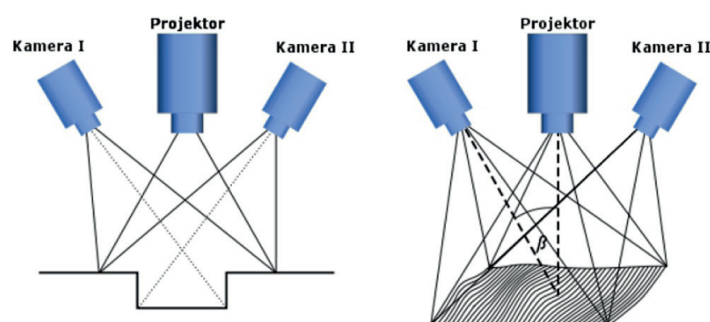
The ν x-reconstruction software enabled data acquisition from the CT scanner and its processing into a volumetric file (comprised of voxels) containing information on internal structure and geometry of the object. The ultimate purpose of VGStudio Max programme concerned data conversion from CT to more useful representation in the form of a triangular network with the highest accuracy possible.

W tym przypadku przetwarzanie danych polegało na realizacji następujących zadań:

- 1) ocenie kompletności i poprawności danych oraz ewentualnej edycji obiektu, polegającej na usunięciu niewłaściwych lub niepotrzebnych elementów bryły,
- 2) określeniu powierzchni, które definiują granice materiału z dokładnością do subwoksela, z interpolacją trójliniową,
- 3) przygotowaniu w celu konwersji do formatu STL (*Standard Triangulation Language*).

Tak przygotowana sieć trójkątów stanowiła model obiektu rzeczywistego, który można było zastosować do porównań z modelem nominalnym (modelem wzorca) CAD lub dwóch takich samych modeli, np. otrzymanych przez skanowanie różnymi metodami. Wynikiem porównań było otrzymanie kolorowej mapy odchyłek, która przedstawiła poglądowo odchyłki dużej liczby punktów pomiarowych. Dodatkowo została wzbogacona o punkty inspekcyjne przedstawiające liczbowo odchyłki od nominalu.

Metoda optycznego skanowania światłem białym opisana została na przykładzie skanera optycznego 3D Atos III, który został użyty do prezentowanych w niniejszym artykule badań. Metoda ta wykorzystuje zasadę triangulacji: projektor rzuca prążki na mierzony obiekt, których przebieg jest rejestrowany przez dwie kamery (rys. 5) [7,8]. Znane położenie kamer w stosunku do projektora, pozwala na precyzyjne obliczenie współrzędnościowego punktu pomiarowego dla każdego piksela kamer.



Rys. 5. Schemat działania skanera optycznego (światłem białym) [9]

Fig. 5. Operating diagram of optical scanner (white light) [9]

Ponieważ skanowanie obiektu polega na kilkukrotnym pomiarze z różnych stron i pod różnym kątem, na obiekt nanosi się punkty referencyjne (rys. 2 i 3), które umożliwiają orientację powierzchni w przestrzeni oraz łączenie obrazów ze sobą. Każdy pojedynczy pomiar jest automatycznie i bez jakiegokolwiek wpływu

In this case data processing concerned the performance of following tasks:

- 1) assessment of completeness and correctness of the data and potential editing of the object concerning the elimination of incorrect or unnecessary elements of the body,
- 2) determination of surface defining the borders of the material exact to one subvoxel, with three-line interpolation,
- 3) preparation for conversion to STL format (*Standard Triangulation Language*).

Such a prepared triangular network constituted the model of the actual object, which could be applied to comparisons with the nominal model (standard model) CAD or two identical models, e.g. obtained by scanning under different methods. The comparisons resulted in production of a colour map of deviations, which was presenting schematically the deviations of a large number of measurement points. It was additionally supplemented by inspection points presenting numerically the deviations from the nominal values.

Optical scanning with white light method is described based on optical scanner 3D Atos III, which was used in the tests described in this paper. This method uses the triangulation principle: the projector projects the bands on the measured object, whose passage is recorded by two cameras (Fig. 5) [7,8]. The known location of cameras in relation to the projector allows for precise calculation of the ordinate measurement point for every pixel of the cameras.

As scanning of the object concerns performance of the measurement a few times from different sides and at different angles, the reference points are put on the object (Figs. 2 and 3), which enable orientation of the surface in space and merging of the images with each other. Every single measurement is recorded au-

operatora zapisywany do globalnego układu współrzędnych.

Obiekt umieszcza się na obrotowym stole z napędem elektrycznym, a następnie wykonuje pomiary, które pozwalają na otrzymanie wirtualnych modeli [9,10,11].

W trakcie skanowania, system stale i automatycznie kontroluje wszystkie czynniki uboczne wpływające na jakość danych pomiarowych.

Dokładność skanowania zależy od wielkości pola pomiarowego, które jest efektem użytych obiektywów. Rodzaj zastosowanego pola jest uzależniony od gabarytów skanowanego detalu. Im mniejsze pole pomiarowe, tym większa dokładność odwzorowania, czyli mniejsza niepewność skanowania. Dla badanych obiektów użyto pola pomiarowego 150 mm × 150 mm. Niepewność badania wynosiła 0,02 mm.

Stanowisko to pozwoliło na kompletne zdigitalizowanie testowanego detalu oraz szybkie porównanie geometrii z danymi konstruktorskimi CAD lub z zatwierdzonym modelem wzorcowym.

Wynikiem skanowania były zbiory punktów (tzw. chmury punktów), które zostały przetransformowane do siatki trójkątów dającej się edytować. Utworzona sieć była jeszcze poddana obróbce, mającej za zadanie:

- 1) usunięcie dublujących się powierzchni i trójkątów (tzw. intersekcje),
- 2) usunięcie punktów referencyjnych,
- 3) wypełnienie nieciągłości powierzchni,
- 4) wygładzenie powierzchni modelu wirtualnego w celu wyeliminowania zbędnych szumów; tolerancja tej operacji wynosiła $\pm 0,01$ mm,
- 5) usunięcie fragmentów powierzchni detalu, które nie podlegały badaniom wymiarowym (np. pozostałość po układzie wlewowym).

Przygotowane w ten sposób wirtualne modele mogły zostać poddane porównaniu czy weryfikacji wymiarowej z modelem wzorcowym.

Porównanie trójwymiarowych modeli zostało wykonane za pomocą oprogramowania ATOS według schematu przedstawionego na [rysunku 6](#). Analiza wymiarowa polegała na porównywaniu siatek wieloboków z danymi CAD, czyli określeniu odchyłek pomiarowych w kierunku danych CAD. Oznacza to, że system oblicza najkrótszą prostopadłą odległość każdego punktu danych pomiarowych od powierzchni modelu CAD [7]. Wynikiem takiego porównania jest kolorowa mapa odchyłek, która pokazuje powstałe deformacje. Przez wpisanie limitów tolerancji, szybko i jasno, ukazane są obszary niezgodności geometrycznej detalu. Wyniki w postaci kolorowych map odchyłek są czytelne i proste do interpretacji. Po wprowadzonych korektach,

tomatically in the global coordinate system without any intervention of the operator.

The object is placed on a rotating table with an electrical drive followed by performing a set of measurements, which allow for obtaining virtual models [9,10,11].

The system automatically detects bad measurements related to external factors during scanning.

The accuracy of scanning depends on the size of the measurement field, which is the result of the lenses used, The type of field used depends on the dimensions of the scanned detail. With the use of a smaller measurement field a greater accuracy of the reconstruction surface was obtained. The 150 mm × 150 mm measurement field was used for the tested objects. The uncertainty of the test was 0.02 mm.

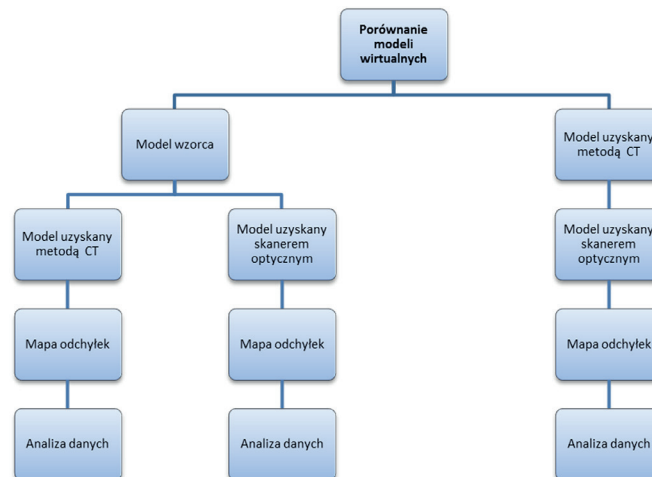
This station provided for complete digitalisation of the tested detail and quick comparison of geometry with CAD construction data or the approved standard model.

The point sets (so called point clouds) were the result of the scanning process, which were subsequently transformed to the editable triangular network. The created network was further processed in order to:

- 1) eliminate the duplicated surfaces and triangles (so called intersections),
- 2) remove the reference points,
- 3) fill the surface flows,
- 4) smooth the surface of the virtual model to eliminate redundant noise; the tolerance of this operation was ± 0.01 mm,
- 5) remove fragments of the detail's surface, which were not covered by dimensional tests (e.g. leftover from the pouring system).

The virtual models prepared in this manner could be then subjected to comparison or dimensional verification against the standard model.

The comparison of three-dimensional models was conducted with the use of ATOS software according to the diagram resented in [Figure 6](#). The dimensional analysis concerned the comparison of the polygonal networks with CAD data, i.e. determination of dimensional deviations towards CAD data. This means that the system calculates the shortest perpendicular distance of every measurement data point from the surface of the CAD model [7]. This comparison generates a colour map of deviations, which shows the occurring deformations. The areas of detail concerning geometrical inconsistency are quickly and clearly presented by entering the tolerance limits. The results in the form of colour deviation maps are transparent and easy to



Rys. 6. Schemat porównań trójwymiarowych modeli wirtualnych

Fig. 6. Diagram of comparisons of three-dimensional virtual models

można powtórzyć inspekcje i porównać gotowy wyrób nie tylko z modelem CAD, ale też z innym podobnym detalem.

W przypadku, gdy nie posiadamy rysunku nominalnego (wzorcowego), a istnieje potrzeba weryfikacji wymiarowej, to można wykonać pomiary odległości i kątów poszczególnych powierzchni detalu. Istnieje również możliwość kontroli tolerancji kształtu i położenia przedstawionych uprzednio na dokumentacji (2D) konstrukcyjnej detalu. Nie było to jednak celem przedstawionych badań.

Aby zdefiniować maksymalne odchyłki wymiarowe detalu możemy odwołać się do normy PN-EN ISO 8062-3:2009 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Tolerancje wymiarowe i geometryczne wyrobów formowanych. Część 3: Ogólne tolerancje wymiarowe i geometryczne oraz dodatki na obróbkę skrawaniem odlewów. Norma ta przedstawia interpretacje geometryczne spotykanych w praktyce rozwiązań. Zawiera ona klasy tolerancji wymiarowych i stopnie dodatków na obróbkę skrawaniem dla różnych tworzyw odlewniczych w zależności od metody odlewania. Klasy tolerancji są zróżnicowane w zależności od użytej technologii odlewniczej i wielkości produkcji [12].

3. Wyniki badań i ich dyskusja

W celu wykonania analiz pomiarowych potrzebne było uzyskanie modelu wirtualnego przy wykorzystaniu przestrzennej techniki pomiarowej.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono modele wirtualne uzyskane z wykorzystaniem metody CT, zbudowane z wokseli i odwzorowujące rzeczywiste obiekty. Uzyskane po skanowaniu trójwymiarowe obiekty były podstawą do utworzenia reprezentacji trójwymiarowej – modelu powierzchniowego STL. Wygenerowane modele wir-

interpret. The inspections can be re-performed following the adjustments entered and the finished product can be compared with both the CAD model and another similar detail.

If dimensional verification has to be conducted and there is a nominal (master) drawing, the distances and angles of individual surfaces of the detail can be taken. The tolerance of the shape and position of detail presented previously on constructional (2D) documentation of the drawing can be controlled as well. However this was not the purpose of the discussed tests.

A reference can be made to standard PN-EN ISO 8062-3:2009 Specifications of products geometry (GPS). Dimensional and geometrical tolerances of moulded products. Part 3: General dimensional and geometrical tolerances and allowances for castings machining, in order to define the maximum dimensional deviations of the detail. This standard presents geometrical interpretations of solutions encountered in practice. It contains the categories of dimensional tolerances and degrees of allowances for machining for various moulding materials depending on the moulding method. The tolerance categories are differentiated in terms of the moulding technology used and the production volume [12].

3. Results of the tests and discussion

The performance of measurement analyses required obtaining a virtual model with the use of spatial metrological methodology.

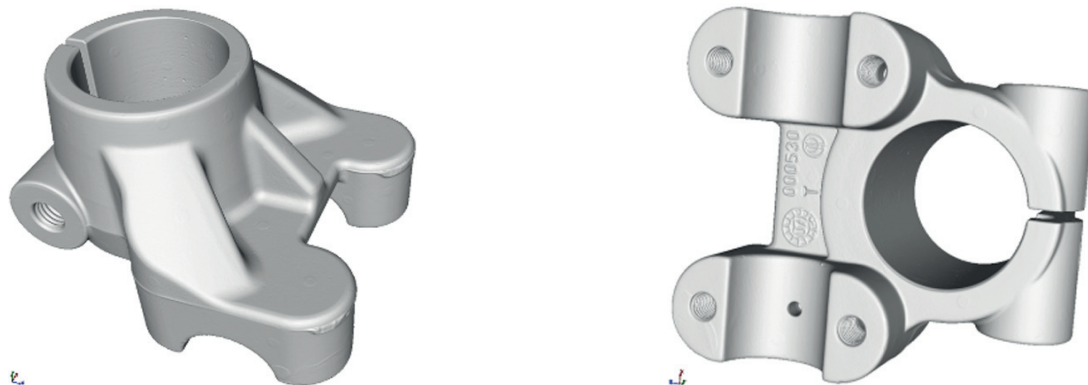
Figures 7 and 8 present the virtual models obtained with the support of CT method, built from voxels and mapping actual objects. The three-dimensional objects obtained as a result of the scanning process formed the basis to create a three-dimensional representation – STL surface model. The generated virtual

tualne w postaci siatki trójkątów zostały przedstawione na rysunkach 9 i 10.

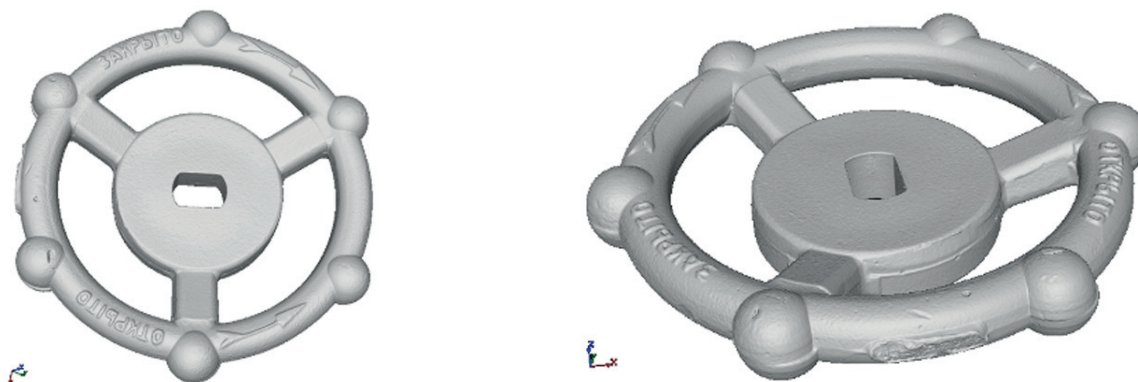
W wyniku skanowania obiektów z wykorzystaniem metody optycznej uzyskano cyfrowe modele 3D w formacie STL. Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wygenerowane modele wirtualne w postaci siatki trójkątów, które mogą posłużyć do analiz pomiarowych.

models in the form of a triangular network are presented in Figures 9 and 10.

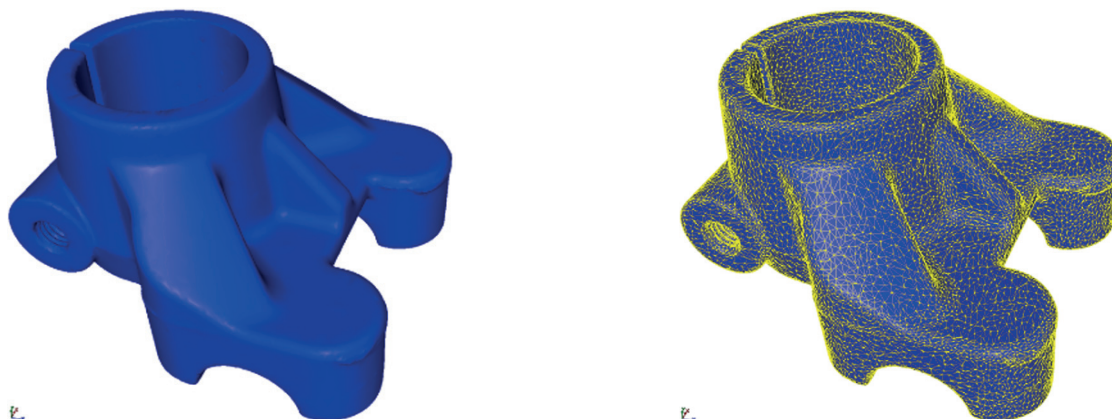
The 3D digital models in STL format were obtained as a result of scanning the objects with the support of the optical method. Figures 11 and 12 present the generated virtual models in the form of a triangular network, which can be used for dimensional analyses.



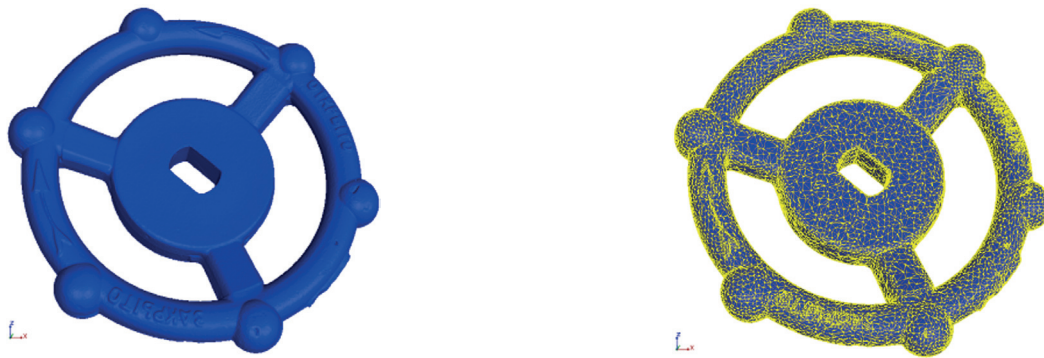
Rys. 7. Model wirtualny uzyskany po skanowaniu (metoda CT). Próbkę nr 1
Fig. 7. Virtual model obtained from scanning (CT method). Sample no. 1



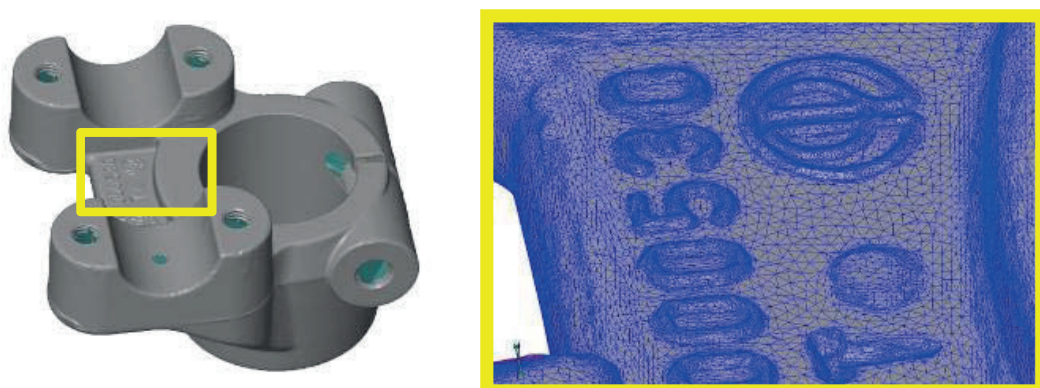
Rys. 8. Model wirtualny uzyskany po skanowaniu (metoda CT). Próbkę nr 2
Fig. 8. Virtual model obtained from scanning (CT method). Sample no. 2



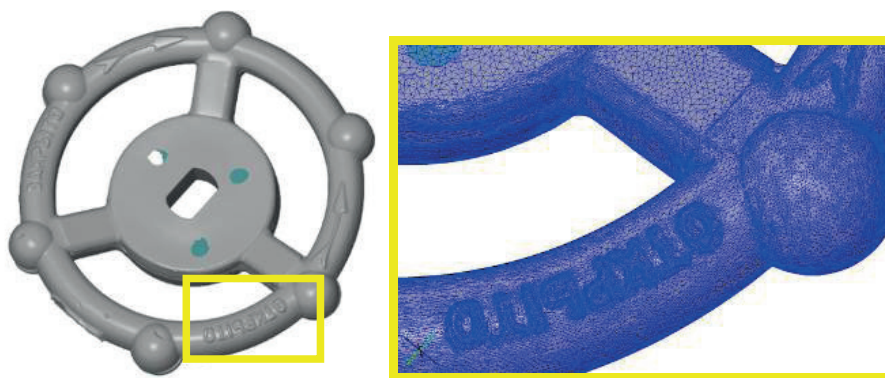
Rys. 9. Model powierzchniowy STL (metoda CT). Próbkę nr 1
Fig. 9. Obtained STL surface model (CT method). Sample no. 1



Rys. 10. Model powierzchniowy STL (metoda CT). Próbkę nr 2
Fig. 10. Obtained STL surface model (CT method). Sample no. 2



Rys. 11. Model powierzchniowy STL uzyskany po skanowaniu skanerem optycznym 3D. Próbkę nr 1
Fig. 11. Virtual model obtained from scanning with 3D optical scanner. Sample no. 1



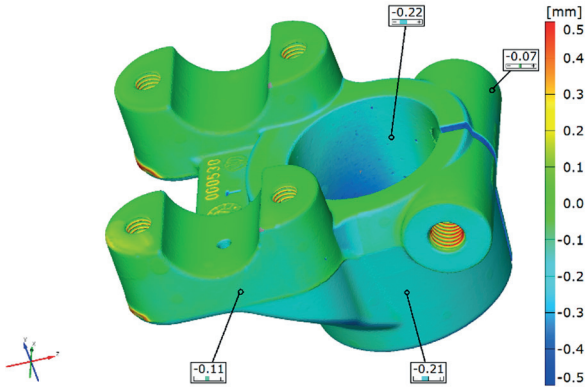
Rys. 12. Model powierzchniowy STL uzyskany po skanowaniu skanerem optycznym 3D. Próbkę nr 2
Fig. 12. STL surface model obtained from scanning with 3D optical scanner. Sample no. 2

Wyniki poszczególnych analiz przedstawiają rysunki 13–17. Odpowiednio dla próbki 1 przeprowadzono analizy odchyłek oraz naniesiono punkty inspekcyjne przedstawiające liczbowo odchyłki od nominalu. Analiza została wykonana kompleksowo zgodnie z bazowaniem układu współrzędnych. Mapa odchyłek wizualizuje pomiar. Każdy punkt w pomiarze był opisywany w trzech wymiarach, czwarta wartość to odchylenie. Porównanie

The results of individual analyses are presented in Figures 13–17. The analyses of deviations were performed and the inspection points present numerically the deviations from a nominal value which was provided respectively for sample 1. The analysis was conducted in a comprehensive manner with the reference positioning of the coordinates system. The map of deviations visualises the measurement. Each point in the measurement

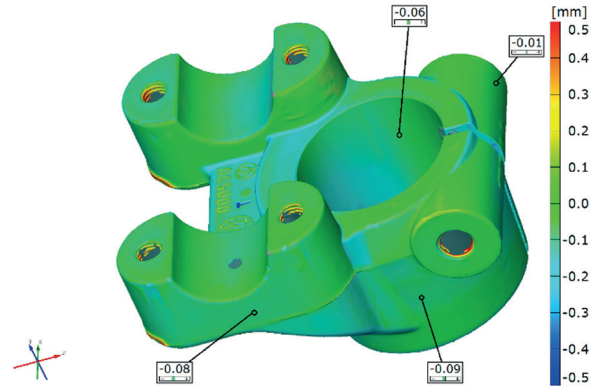
było wykonywane w stosunku do zarysu nominalnego wykonanego z tolerancją, dla której odchyłka (górna, dolna) wynosiła $\pm 0,5$ mm.

was described in three dimensions, while the deviation was the fourth value. The comparison was conducted in relation to the nominal outline conducted with a tolerance, whose deviation (upper, lower) was $\pm 0,5$ mm.



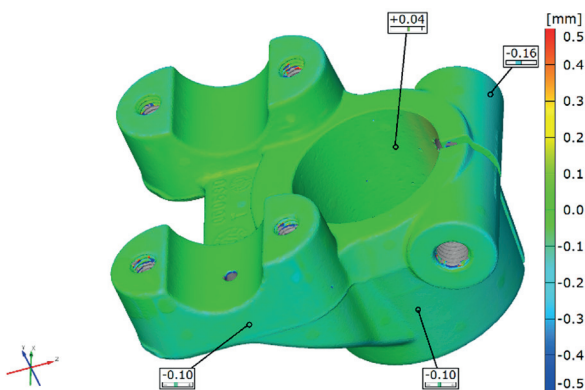
Rys. 13. Wynik porównania modelu wzorcowego z modelem uzyskanym z użyciem metody CT

Fig. 13. Result of comparison of the standard model with the model obtained with the use of CT method



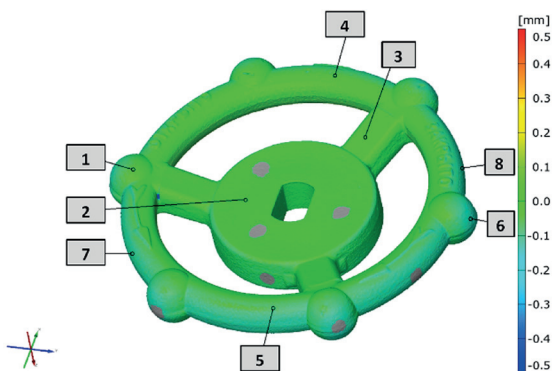
Rys. 14. Wynik porównania modelu wzorcowego z modelem uzyskanym za pomocą skanera optycznego

Fig. 14. Result of comparison of the standard model with the model obtained with the use of optical scanner



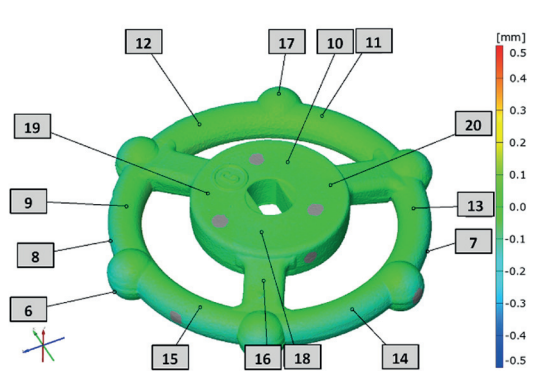
Rys. 15. Wynik porównania modelu uzyskanego z użyciem metody CT z modelem uzyskanym za pomocą skanera optycznego

Fig. 15. Result of comparison of the model obtained with the use of CT method with a model obtained with the use of optical scanner



Rys. 16. Wynik porównania modelu uzyskanego z użyciem metody CT z modelem uzyskanym za pomocą skanera optycznego (przód). Próbkę nr 2

Fig. 16. Result of comparison of a model obtained with the use of CT method against a model obtained with the use of optical scanner (front). Sample no. 2



Rys. 17. Wynik porównania modelu uzyskanego z użyciem metody CT z modelem uzyskanym za pomocą skanera optycznego (tył). Próbkę nr 2

Fig. 17. Result of comparison of a model obtained with the use of CT method against a model obtained with the use of optical scanner (back). Sample no. 2

Wyniki analizy wymiarowej próbki nr 1, dla porównań modelu wzorca z modelem uzyskanym z wykorzystaniem metody CT i skanerem optycznym, wykazują małe wartości odchyłek granicznych. Przedział odchyłek we wszystkich punktach to $<-0,31; 0,44>$ mm. Występujące lokalnie odchyłki o wartościach ujemnych (kolor niebieski) są spowodowane złą obróbką mechaniczną (rys. 13 i 14). Porównanie modelu uzyskanego z użyciem metody CT z modelem uzyskanym skanerem optycznym wykazuje odchyłki w zakresie $<-0,09; 0,06>$ mm, co świadczy o poprawności wykonanych badań tymi metodami. Weryfikacja wykazała oczekiwaną zgodność wymiarową, która gwarantuje poprawne wykonanie detalu rzeczywistego.

Próbka 2 posłużyła do porównania obu metod względem siebie. Jako wzorec zdefiniowano model wykonany za pomocą skanera optycznego. W tabeli 1 przedstawiono wyniki porównania dla wybranych punktów na powierzchni próbki (rys. 16 i 17).

The results of the dimensional analysis of sample no. 1 for comparison of the standard model against the model obtained with the support of CT method and optical scanner method demonstrate small values of borderline deviations. The range of deviations in all points ranged was $<-0.31; 0.44>$ mm. The locally observed deviations with minus values (blue colour) are caused by incorrect mechanical processing (Figs. 13 and 14). The comparison of the model obtained with the use of CT method against a model obtained with the use of the optical scanner shows deviations in the range of $<-0.09; 0.06>$ mm, which demonstrates the correctness of the tests performed with the support of these methods. Verification demonstrated the expected dimensional compliance, which guarantees the correct manufacturing of the actual detail.

Sample no. 2 was used to compare both methods with each other. The model obtained with the use of the optical scanner was defined as a standard. Table 1 presents the results of the comparison for selected points on the surface of the sample (Figs. 16 and 17).

Tabela 1. Wyniki porównania obu metod w wybranych punktach

Table 1. Results of comparison of both methods in selected points

Nr punktu / Point no.	Odchyłka/ Deviation	Nr punktu / Point no.	Odchyłka/ Deviation
1	-0,02	11	-0,01
2	-0,02	12	0
3	+0,01	13	-0,01
4	-0,03	14	-0,11
5	-0,07	15	-0,04
6	-0,13	16	-0,05
7	-0,11	17	-0,04
8	-0,12	18	-0,04
9	-0,02	19	-0,02
10	-0,04	20	-0,03

4. Wnioski

Rozwój nowych metod w dziedzinie metrologii pozwala na pomiary i analizę odpowiedzialnych odlewów czy wyrobów konstrukcyjnych w bardziej precyzyjny sposób. Uzyskane wyniki otwierają nowe możliwości w wykorzystaniu rentgenowskiej tomografii komputerowej w inżynierii pomiarowej. Jest to o tyle ważne, że stosując metodę CT możemy uzyskać informacje dotyczące nie tylko skomplikowanej geometrii obiektu, ale jednocześnie jego wewnętrznej struktury. Otrzymane dane można poddać obróbce, aby mogły posłużyć do dalszych badań, np. pod kątem analizy geometrii czy budowy wewnętrznej materiału. Informacje te mogą być również wykorzystane do poprawienia jakości i funkcjo-

4. Conclusions

The development of new methods in the metrology area allows for the measurement and analysis of responsible castings or constructional products in a more precise manner. The obtained results create new opportunities for the use of X-ray computed tomography in metrological engineering. This is particularly important as by using the CT method we can obtain information regarding not just the complex geometry of the object, but its internal structure as well. The obtained data can be processed to be used for further studies, e.g. in terms of geometry analysis or internal structure of the material. This information can be also used to improve the quality and functionality of the product and shorten the time

nalności produktu oraz do skrócenia czasu potrzebnego na jego opracowanie. Dodatkowo są na tyle wystarczające, aby mogły posłużyć do odtworzenia badanego obiektu z użyciem metod szybkiego prototypowania.

required for its development. The data is also sufficient enough to be used to reconstruct the tested object with the use of rapid prototyping methods.

1. Przedstawione wyniki badań świadczą o pełnej przydatności metod skanowania 3D do analizy geometrii wielu obiektów o bardzo skomplikowanych kształtach.
2. Użyte metody są metodami nieniszczącymi, przez co umożliwiają pomiar obiektów w sposób bezinwazyjny. Analiza za pomocą metod stykowych byłaby trudna i niedokładna.
3. Użyte metody umożliwiają porównanie wartości nominalnych i rzeczywistych między pomiarem i danymi, takimi jak: model CAD, chmury punktów lub dane STL.
4. Użyte metody w badaniach tego typu detali nie wprowadzają istotnych różnic w wynikach pomiarowych.
5. Skanowanie metodą optyczną charakteryzuje się dużą szybkością digitalizacji w stosunku do metody tomografii komputerowej i jest tańszym sposobem wykonania pomiarów.
6. Skanowanie optyczne posiada ograniczenia w badaniach obiektów o skomplikowanej geometrii.
7. Modele uzyskane za pomocą metody TK zawierają informację o geometrii obiektu i jego wewnętrznej strukturze, przez co zastosowanie metody TK zwiększa możliwości badań dla tego obszaru obiektów fizycznych.
8. Metoda TK posiada ograniczenia w przypadku badań materiałów o dużej gęstości lub sporej grubości ścianki. Ograniczenia te wynikają ze specyfiki urządzenia (stopnia absorpcji promieniowania rentgenowskiego przez materiał).
9. Za pomocą prezentowanych metod może być realizowana kontrola jakości, na przykład przy weryfikacji dokładności wzajemnego dopasowania elementów przez wirtualny montaż w oprogramowaniu, a także zmiany kształtu powierzchni spowodowane uszkodzeniami.
10. Metody te umożliwiają tworzenie danych do wytwarzania lub kopiowania wyrobów, np. w systemach *Rapid-Prototyping*.
1. The presented results of the tests demonstrate the complete suitability of 3D scanning methods for analysis of many objects with very complex shapes.
2. The methods used are non-destructive, which allows non-invasive measurement of the objects. The analysis with the use of contact methods would be difficult and imprecise.
3. The methods used enable the comparison of nominal and actual values between the measurement and the data such as CAD model, point clouds or STL data.
4. The methods used in the tests of this detail type do not introduce material differences in the measurement results.
5. Scanning under the optical method is characterised by a high speed of digitalisation in relation to the computed tomography method and is a cheaper method of conducting the measurements.
6. Optical scanning has some limitations when testing the objects with complex geometry.
7. The model obtained under the CT method contains information on geometry of the object and its internal structure, which thus increases the testing capabilities for this area of physical objects by using the CT method.
8. The CT method has some limitations in the case of tests of materials that have a high density or large wall thickness. These limitations result from the specific properties of the device (degree of absorption of the X-ray radiation by the material).
9. The methods presented in this paper can be used to perform quality control, e.g. during the verification of the accuracy of mutual fitting of the elements through virtual assembly within the software and the changes to the shape of the surface caused by damage.
10. These methods allow for the creation of data for production or duplication of the products, e.g. in *Rapid-Prototyping* systems.

11. Przedstawione wyniki pokazują, że rozwój technik współrzędnych pozwala na pomiary i analizę w bardziej komfortowy sposób.
11. The presented results demonstrate that the development of the coordinate measurement method allows for a more comfortable performance of measurements and analyses.

Podziękowania

W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych w ramach projektu statutowego (zlec. 3019/00) finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Acknowledgements

The paper presents results of the research conducted under a statutory project (no. 3019/00) financed by the Ministry of Science and Higher Education.

Literatura/References

1. Olszewska M., Gąska A. (2011). Porównanie różnych urządzeń metrologicznych wykorzystywanych w zastosowaniach biomedycznych. *Postępy Nauki i Techniki*, (6), 155–163.
2. Chlebus E. et al. *Mechatronika. Moduł 9: Szybkie Prototypowanie – podręczniki, ćwiczenia i rozwiązania*. Politechnika Wroclawska, UE-Projekt Nr. DE/08/LLP-LdV/T01/147110 „MINOS + +”, 2008–2010.
3. *Instrukcja obsługi GE Sensing & Inspection Technologies phoenix|x-ray, datos|x – reconstruction. Wersja 1.5*, (2009).
4. Herman G.T. (2009). *Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections*. London: Springer.
5. Banhart J. (2008). *Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering*. Oxford University Press.
6. Bushong S.C. (2000). *Computed Tomography*. McGraw-Hill Medical.
7. Gil A., Kowalski P., Wańczyk K. (2011). Using 3D scanner as a tool for the verification of prototype casting shape. *Arch. Foundry Engin.*, 11(sp. issue 1), 58–62.
8. Dzienis P., Łukaszewicz P. (2011). Przygotowanie danych CAD w procesie inżynierii odwrotnej w rzeźbiarstwie. *Postępy Nauki i Techniki*, (7), 133–140.
9. Karczewski M., Koliński K., Walentynowicz J. (2011). Wykorzystanie skanera 3D do analizy uszkodzeń silników spalinowych. *Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej*, 52(1), 59–66.
10. Karwiński A., Kowalski P. (2009). *Zastosowanie wspomagania komputerowego w tym technik RPS do wykonywania krótkich serii prototypowych odlewów precyzyjnych*. Konferencja EUROMOLD, Frankfurt 02–05.12.2009.
11. Wyleżoł M. (2006). Inżynieria odwrotna w doskonaleniu konstrukcji. *Modelowanie Inżynierskie*, 1(32), 485–490.
12. PN-EN ISO 8062-3:2009P Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Tolerancje wymiarowe i geometryczne wyrobów formowanych. Część 3: Ogólne tolerancje wymiarowe i geometryczne oraz naddatki na obróbkę skrawaniem odlewów.

