

**Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej do wspomagania
badań materiałowych odlewów**

The use of X-ray computed tomography as a tool in assisting cast material testing

Izabela Krzak¹, Adam Tchórz¹

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

¹ Foundry Research Institute, Complex of Accredited Research Laboratories, Laboratory for Non-destructive Testing,
30-418 Kraków, Poland

E-mail: izabela.krzak@iod.krakow.pl

Streszczenie

Abstract

Technologia wytwarzania odlewów zależna jest od wielu czynników. Warunki techniczne odbioru odlewów określają wymaganą jakość, co jest podstawą do uznania odlewu za dopuszczalny bądź wadliwy. W praktyce produkcja odlewów bez pewnej ilości sztuk wadliwych nie jest możliwa. Dąży się jednak do zminimalizowania strat, stosując różnorodną aparaturę kontrolno-pomiarową. Do sprawdzenia wewnętrznej struktury wyrobu pomocna może być rentgenowska tomografia komputerowa (ang. Computed Tomography – CT). Jest to nowoczesna metoda diagnostyczna, która łączy badania rentgenowskie z zaawansowaną technologią komputerową. Badania tomograficzne umożliwiają bezinwazyjną jakościową ocenę badanego materiału oraz przeprowadzenie zaawansowanych analiz. Jedną z podstawowych zalet rentgenowskiej tomografii CT jest zobrazowanie badanych struktur w trzech wymiarach oraz możliwość wykonania rekonstrukcji przestrzennych.

Przedmiotem artykułu jest przybliżenie zasady działania rentgenowskiej tomografii komputerowej oraz omówienie szerokiego jej wykorzystania w różnych dziedzinach nauki, w szczególności w badaniach defektoskopowych, w ilościowych badaniach metalograficznych, w procesie inżynierii odwrotnej (rekonstrukcyjnej) oraz w badaniach metrologicznych. Na wybranych przykładach przedstawiono możliwości rentgenowskiej tomografii komputerowej.

Słowa kluczowe: rentgenowska tomografia komputerowa (CT), badania defektoskopowe, niskociśnieniowe odlewanie przeciwważeniowe (CLA), szybkie prototypowanie (RP), inżynieria odwrotna (RE)

Casting manufacture depends on many factors. Technical specifications determine the required quality, which is essential for casting acceptance or rejection. Practice shows that making castings without defects is simply not possible. However, the aim is to minimize rejects owing to the use of diverse instruments for measurements and control. A tool which may be helpful in checking the internal structure of products is the X-ray computed tomography (CT). CT is a modern diagnostic method that combines X-ray examinations with advanced computer technology. Tomographic studies allow non-destructive qualitative assessment of the test material combined with advanced analysis. One of the main advantages of the X-ray computed tomography is imaging of the examined structure in three dimensions and the ability to perform spatial reconstruction.

The aim of this article is to describe the principle operation of X-ray computed tomography and offer extensive discussion of its use in various fields of science, in particular to defect detection, quantitative metallographic tests, the process of reverse engineering (reconstruction) and metrological studies. Selected examples were used to show the potential offered by this technique.

Keywords: X-ray computed tomography (CT), flaw detection, counter-gravity low-pressure air-melted casting (CLA), rapid prototyping (RP), reverse engineering (RE)

1. Wprowadzenie

Wszystkie odlewy mogą być obciążone wadami. Pod pojęciem wad odlewniczych rozumiemy odchylenia cech materiału, struktury oraz właściwości mechanicznych lub fizykochemicznych od obowiązujących wymagań [1]. Znaczący rozwój technologiczny umożliwia bezinwazyjne sprawdzenie wewnętrznej struktury wyrobu, np. przy użyciu rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT). Wykorzystując promieniowanie rentgenowskie i zaawansowaną technologię komputerową, można zrealizować jakościową ocenę badanego materiału oraz przeprowadzić zaawansowane analizy. Dzięki dużej rozdzielczości możliwe jest bardzo dokładne odwzorowanie złożonej powierzchni badanego obiektu. Pozwala to na przedstawienie nieciągłości wewnętrznych w postaci dwuwymiarowej, jak i przestrzennej, a co za tym idzie na dokładną ich lokalizację.

Tomografia komputerowa jest szeroko wykorzystywana w dziedzinie inżynierii materiałowej, mikromechanice, elektronice, geologii, biologii oraz medycynie, a w szczególności w badaniach defektoskopowych odpowiedzialnych części i urządzeń oraz kontroli wymiarów wewnętrznych [2].

W niniejszej pracy zaprezentowano wybrane przykłady uzyskanych wyników badań zrealizowanych za pomocą rentgenowskiego tomografu komputerowego firmy GE Phoenix typu nanotom oraz typu v|tome|x L-450, będących na wyposażeniu Instytutu Odlewnictwa. Wszystkie operacje związane z obróbką danych z CT były wykonywane za pomocą oprogramowania datos|x - reconstruction, VGStudio Max 2.0 oraz Fiji|s Just ImageJ.

2. Metodyka badań i możliwości zastosowania CT

Badanie z wykorzystaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej polega na zeskanowaniu obiektu wiązką promieniowania X i rejestracji jej natężenia na panelu detektora. Promieniowanie X, przechodząc przez badany obiekt, ulega osłabieniu, które jest funkcją energii promieniowania, rodzaju i grubości badanego materiału [3].

Badania za pomocą przemysłowej tomografii komputerowej mogą odbywać się z wykorzystaniem wiązki stożkowej (rys. 1a) lub liniowej (rys. 1b) promieniowania X. Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku, podczas prześwietlania próbka jest obracana skokowo w małych krokach ($0,25-0,5^\circ$) o 360° wokół jednej osi obrotu. W przypadku prześwietlania w układzie z równoległą wiązką promieniowania dodatkowo efekt skanowania uzyskuje się przez określone pionowe ruchy lampy i detektora. Na podstawie tych danych otrzymuje się obrazy rentgenowskie (radiogramy), z których po odpowiedniej rekonstrukcji komputerowej

1. Introduction

Practically every casting is burdened with the risk of having defects of some kind. The concept of "casting defects" means deviations of material and structure characteristics and of mechanical or physicochemical properties from the applicable specifications [1]. Rapid progress in technology allows non-invasive checking of the internal structure of cast products using e.g. X-ray computed tomography (CT). Using X-rays combined with advanced computer technology enables qualitative evaluation of the test material and carrying out advanced analysis. Owing to the high resolution, a very accurate representation of the complex surface of objects is possible. This allows presentation of internal discontinuities in both 2D and 3D, and thus their exact location.

Computed tomography is widely used in the field of materials science, micromechanics, electronics, geology, biology and medicine. Computed tomography is a tool particularly useful in flaw detection, while testing responsible parts of equipment, and in control of internal dimensions [2].

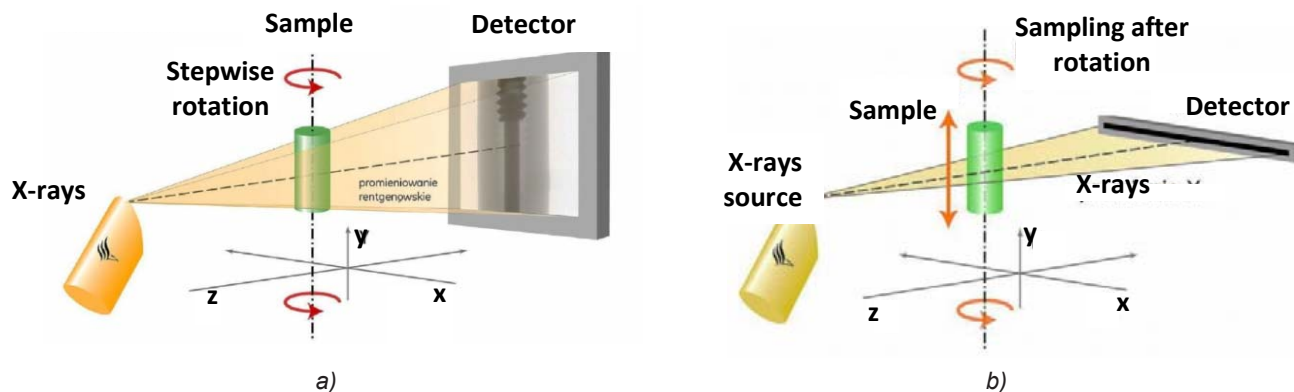
This article presents some examples of the results of studies carried out by X-ray CT using nanotom type and v|tome|x L-450 type scanners from GE Phoenix, forming part of the equipment available in the Foundry Research Institute, Krakow. All operations related to the data processing from CT were performed with the datos|x - reconstruction, VGStudio Max 2.0 and Fiji|s Just ImageJ software.

2. Research methodology and range of CT application

Practical application of X-ray computed tomography is based on scanning the object with a beam of X-rays and then recording the intensity on a detector panel. Passing through an object, the X-radiation is attenuated, and the degree of this attenuation is a function of the energy of radiation, and of the type and thickness of the test material [3].

Industrial computed tomography uses a cone-shaped X-ray beam (Fig. 1a) or a fan-shaped X-ray beam (Fig. 1b). In either case, the scanned object is rotated in small steps ($0.25-0.5^\circ$) by 360° around one axis of rotation. When screening takes place in a system with parallel X-ray beam, the additional scanning effect is achieved by vertical movements of the X-rays source and the detector. Based on this data, X-ray images (radiographs) are obtained, which after proper computer reconstruction give two-dimensional cross-sections of the examined object, these cross-sections giving next a numerically reproduced three-dimensional image.

otrzywać można dwuwymiarowe przekroje badanego przedmiotu, a z nich liczbowo odtwarzany jest obraz trójwymiarowy. Obraz taki można podzielić na wirtualne plastry umożliwiające analizę badanego obiektu pod wieloma kątami [3,4]. W efekcie uzyskujemy informację na temat elementów wewnętrznej struktury materiału, w tym również morfologię nieciągłości wewnętrznych i umiejscowienia ich w przestrzeni. Ponadto możliwe jest precyzyjne określenie wymiarów obiektu zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych.



Rys. 1. Schemat działania tomografu: a) z wiązką stożkową, b) z wiązką płaską [5]

Fig. 1. Schematic representation of CT operation: a) with cone beam, b) with fan beam [5]

W przemyśle metoda ta stosowana jest na coraz większą skalę. Powszechnie CT wykorzystywana jest w badaniach defektoskopowych i do sprawdzenia wewnętrznej struktury w zakresie inżynierii materiałowej (np. do badań polimerów, kompozytów, materiałów syntetycznych, ceramiki, metali i ich stopów), jak również w przemyśle elektronicznym (np. do sprawdzenia ciągłości połączeń poszczególnych elementów), mikromechanice (np. do sprawdzania mikromechanizmów czy podzespołów precyzyjnych), geologii (np. do określenia porowatości w skałach zbiornikowych, w badaniach skamieniałości i minerałów), archeologii (np. w badaniach zabytków archeologicznych), biologii (np. do badania struktury roślin oraz miękkich i twardych tkanek biologicznych). Ponadto metoda rentgenowskiej tomografii komputerowej, dzięki możliwości odtworzenia geometrii elementów o skomplikowanej budowie wewnętrznej, wykorzystywana jest w procesach szybkiego prototypowania (ang. *Rapid Prototyping* – RP) oraz inżynierii odwrotnej, rekonstrukcyjnej (ang. *Reverse Engineering* – RE).

3. Przykładowe wyniki badań

Przykładem zastosowania rentgenowskiej tomografii komputerowej w defektoskopii jest porównanie struktury wewnętrznej dwóch odlewów wykonanych z tego samego materiału – nadlewy technologiczne zbliżone do AlSi9Mg (ENAC-43300). Odlewy te wykonano, stosując

This image can be divided into virtual slices enabling analysis of the examined object from multiple angles [3,4]. The result is information about the elements of the internal structure of the examined material, including morphology of internal discontinuities and their location in space. Additionally, it is possible to precisely determine the object dimensions both externally and internally.

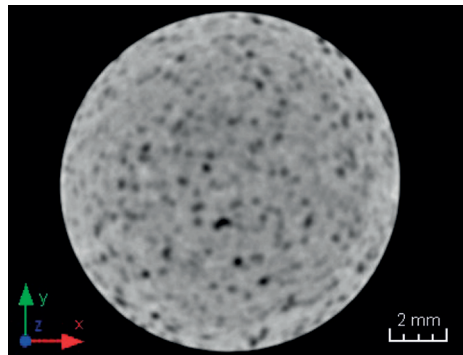
In the industry, this method is used on an increasing scale. CT is commonly used in flaw detection and the checking of the internal structure in materials science and technology (e.g. testing polymers, composites, synthetic materials, ceramics, metals and their alloys) and also in the electronics industry (e.g. to check the continuity of connection of individual elements), micro-mechanics (e.g. to check the micromechanisms of precision components and sub-assemblies), geology (e.g. to determine the porosity in reservoir rocks, in studies of fossils and minerals), archaeology (e.g. in the study of archaeological sites), biology (e.g. the study of plant structure and the soft and hard biological tissues). Additionally, the method of X-ray computed tomography with its ability to reproduce the geometry of a complex internal structure is used in rapid prototyping processes and reverse or reconstructive engineering.

3. Examples of research results

An example of the X-ray computed tomography application in flaw detection is comparison of the internal structure of two castings made of the same material – technological, i.e. the process riser heads of alloys similar to AlSi9Mg (ENAC-43300). The castings were

dwie różne metody odlewania: niskociśnieniowe odlewanie przeciwgrawitacyjne w atmosferze powietrza – CLA (*Counter-gravity Low-pressure Air-melted* – powietrzne, niskociśnieniowe odlewanie przeciwgrawitacyjne) oraz odlewanie grawitacyjne [6]. W pierwszym etapie badania wykonano skanowanie całych próbek o długości 170 mm i średnicy 12 mm. Wielkość woksela¹ podczas prześwietlania wynosiła 40,5 μm. Skanowanie to miało na celu określenie rozłożenia porowatości w całej objętości odlewu oraz wytypowanie reprezentatywnych obszarów do przeprowadzenia kolejnej, ale zarazem wnikliwej analizy tych nieciągłości. Porównując rozłożenie porowatości w całej objętości próbek, nie stwierdzono znaczącej różnicy pomiędzy zastosowanymi metodami odlewania. W obu przypadkach zaobserwowano równomiernie rozłożone drobne nieciągłości strukturalne w całym obszarze odlewu (rys. 2 i 3).

made by two different techniques, i.e. Counter-gravity Low-pressure Air-melted process (CLA) and gravity casting [6]. The first stage of the study comprised of scanning the entire sample 170 mm long and with a diameter of 12 mm. Voxel¹ size in scanning was 40.5 μm. The scanning was done to determine the distribution of porosity in the whole volume of the casting and select representative areas to conduct further exact analysis of the discontinuities. Comparing the distribution of porosity in the whole volume of the samples, no significant difference was observed between the two applied casting methods. In both cases, fine structural discontinuities uniformly distributed in the entire area of the casting were observed (Figs. 2 and 3).



a)

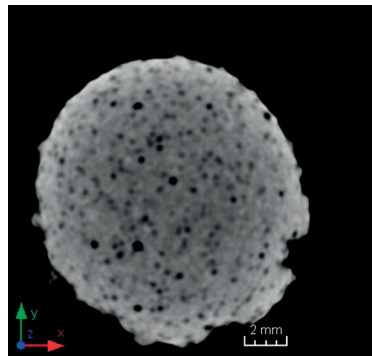


b)

Rys. 2. Tomogramy obrazujące strukturę wewnętrzną wałka odlanego z zastosowaniem metody CLA:

a) widok w układzie osi xy, b) widok w układzie osi yz

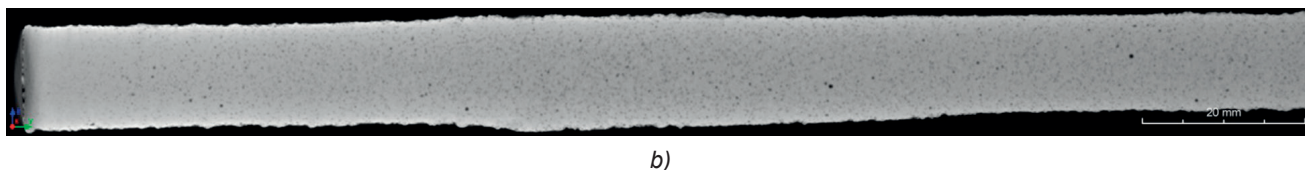
Fig. 2. Tomograms showing the internal structure of rod cast by CLA: a) view in xy system, b) view in yz system



a)

¹ Woksel – (voxel – *volumetric element*) jednostka obrazu przestrzennego 3D (odpowiednik piksela dla obrazu 2D).

¹ Voxel (volumetric element) – a unit of the 3D spatial image (equivalent to pixel used in 2D images).



Rys. 3. Tomogramy obrazujące strukturę wewnętrzną wałka odlanego grawitacyjnie:
a) widok w układzie osi xy, b) widok w układzie osi yz

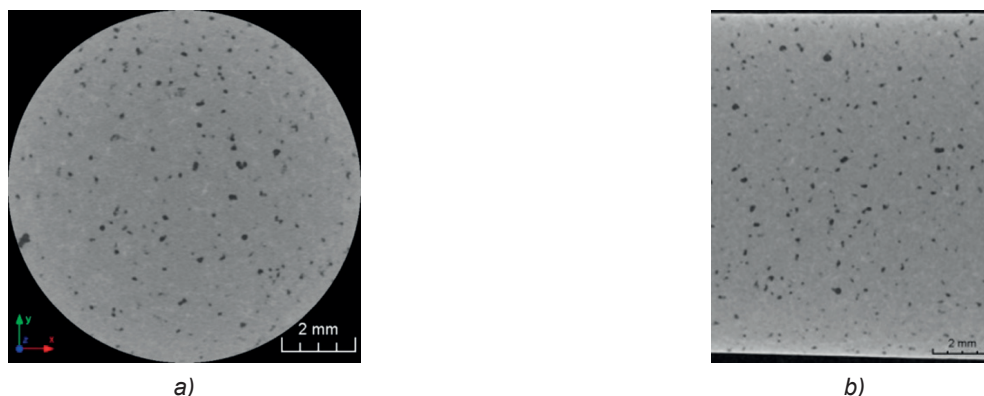
Fig. 3. Tomograms showing the internal structure of rod cast by gravity: a) view in xy system, b) view in yz system

W drugim etapie wykonano badania, stosując metodę CT z większą rozdzielczością (woksel = $14,7 \mu\text{m}$) wybranego obszaru próbki. Zarówno w próbce otrzymanej w procesie CLA, jak i odlanej grawitacyjnie, wyraźnie da się zauważyć znaczące nieciągłości w strukturze, co przedstawiają wybrane tomogramy na rysunku 4 i 5. Biorąc pod uwagę błąd wynikający z metody pomiarowej i obróbki danych, wartości te są porównywalne. Procentowy udział porów w badanych próbkach wynosi: w metodzie CLA – 1,65%, a w metodzie grawitacyjnej – 1,73%. Rozmieszczenie porowatości gazowych w obu próbkach jest równomierne. Można jednak zauważyć, że w próbce odlewanej grawitacyjnie, pory przyjmują kształt bardziej kulisty, natomiast w próbce wytwarzanej z zastosowaniem metody CLA – nieregularny. Ponadto w próbce tej stwierdzono mniejszą średnią objętość porów w porównaniu do próbki odlanej grawitacyjnie. W procesie CLA objętość największej nieciągłości strukturalnej (poru) jest mniejsza od $0,025 \text{ mm}^3$, natomiast po odlewaniu grawitacyjnym dochodzi do $0,04 \text{ mm}^3$ [6]. Na rysunku 6 przedstawiono przykładową wizualizację 3D rozmieszczenia wad w badanych próbkach, wynikającą z porowatości gazowej.

Badania rentgenowskie CT można również zastosować do sprawdzenia poprawności analizy numerycznej opracowanej technologii odlewniczej. Przykładem na to są dysze palnika DN100 ze stopu niklu H282 wykonane w Instytucie Odlewnictwa w dwóch różnych wariantach technologicznych: zalewania przez nadlew i zalewania syfonowego [7].

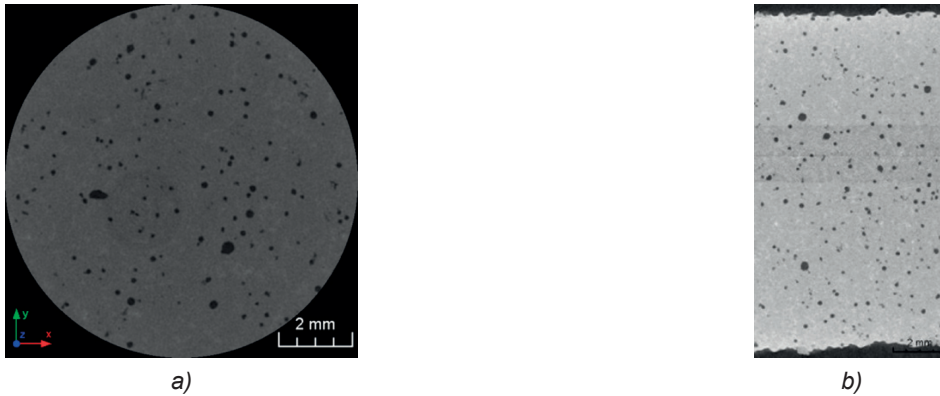
In the second stage, tests were performed by CT at a higher resolution (voxel size = $14.7 \mu\text{m}$) used for scanning the selected area of the sample. Both samples, i.e. obtained by CLA and gravity cast, clearly show the presence of large discontinuities in the structure visible on selected tomograms in Figures 4 and 5. Considering the resulting error of measurement and data processing, these values are comparable. The percentage share of porosity in the tested samples is as follows: for CLA – 1.65%, and for the gravity casting – 1.73%. The distribution of gas porosity in both samples is uneven. It may be noted, however, that in the gravity cast sample, pores are more spherical in shape, while in the sample produced by CLA they are more irregular. Moreover, the CLA sample has a lower mean pore volume as compared to the sample cast by gravity. In the CLA process, the volume of the largest structural discontinuity (pore) is less than 0.025 mm^3 , while after the gravity casting it reaches 0.04 mm^3 [6]. Figure 6 shows an example of the 3D visualization of the distribution of defects in the examined samples resulting from the presence of gas porosity.

X-ray CT can also serve as a tool to validate numerical analysis of the developed casting technology. A good example is the DN100 burner nozzle made from H282 nickel alloy in the Foundry Research Institute in two different variants of technology, i.e. by pouring from the top through a riser and by bottom pouring [7].

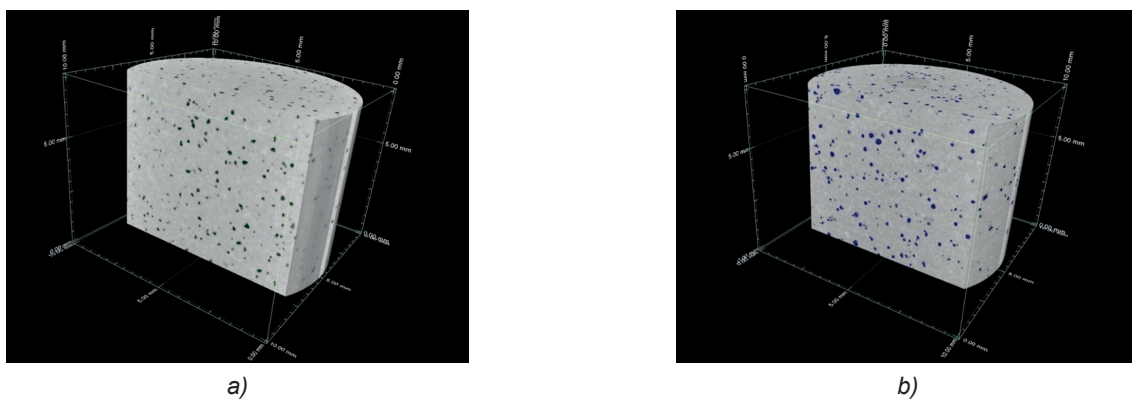


Rys. 4. Wybrany przekrój 2D fragmentu wałka odlanego z zastosowaniem metody CLA:
a) widok w układzie osi xy, b) widok w układzie osi yz

Fig. 4. Selected 2D cross-section of part of the rod cast by CLA: a) view in xy system, b) view in yz system



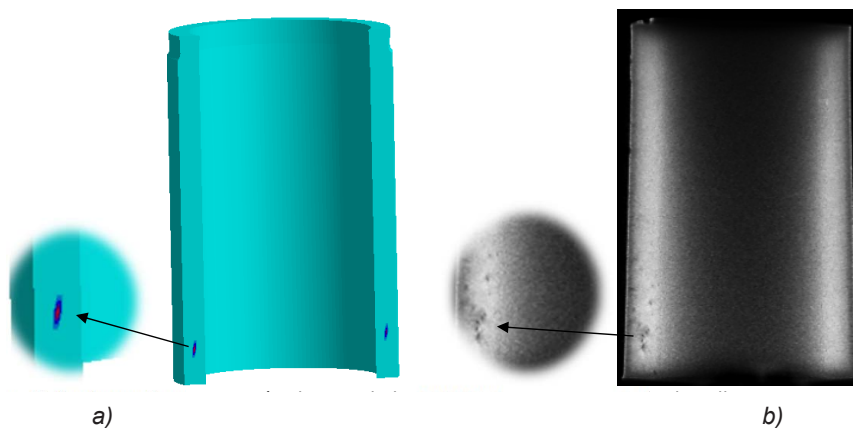
Rys. 5. Wybrany przekrój 2D fragmentu wałka odlanego grawitacyjnie: a) widok w układzie osi xy, b) widok w układzie osi yz
 Fig. 5. Selected 2D cross-section of part of the rod cast by gravity: a) view in xy system, b) view in yz system



Rys. 6. Wybrany przekrój 2D fragmentu wałka odlanego grawitacyjnie: a) widok w układzie osi xy, b) widok w układzie osi yz
 Fig. 6. Spatial cross-section through part of the examined rod cast by: a) CLA, b) gravity

Przewidywane na drodze symulacji komputerowej wewnętrzne nieciągłości w ściankach dyszy zalewanej przez nadlew zostały potwierdzone w odlewie rzeczywistym, co wykazały badania tomograficzne (rys. 7), natomiast w odlewie takiej dyszy, ale zalewanej syfonowo, badania CT potwierdziły brak wewnętrznych wad.

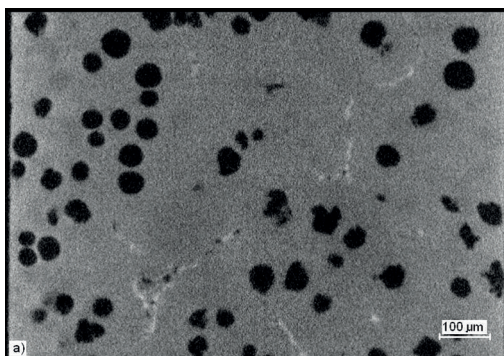
The internal discontinuities predicted by computer simulation in the wall of the nozzle poured through a riser appeared in the actual casting as shown by CT scanning (Fig. 7); in the casting of the same nozzle by bottom-pouring, CT confirmed the lack of internal defects.



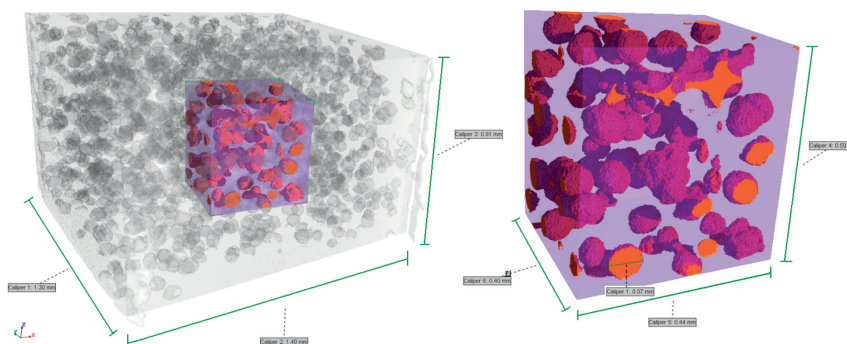
Rys. 7. Porównanie porowości dyszy palnika DN100 do wygrzewania kadzi odlewniczej zalewanej przez nadlew stopem niklu H282: a) odlew wirtualny, b) odlew rzeczywisty
 Fig. 7. Comparison of porosity in casting of the DN100 burner nozzle for ladle preheating poured from the top through a riser using H282 nickel alloy: a) virtual casting, b) real casting

Rentgenowska tomografia komputerowa może być również wykorzystana w ilościowych badaniach metalograficznych. Przykładem na to jest określenie udziału objętościowego grafitu w żeliwie sferoidalnym. W wyniku zastosowania CT uzyskano tomogramy obrazujące mikrostrukturę z grafitem sferoidalnym (rys. 8). Zgromadzone dane wykorzystano do numerycznej rekonstrukcji objętościowej. Rezultatem była wizualizacja 3D badanego obiektu, z której wytypowano fragment do analizy, co przedstawia rysunek 9. Rozkład wielkości cząstek grafitu analizowanego fragmentu ukazuje rysunek 10 [2].

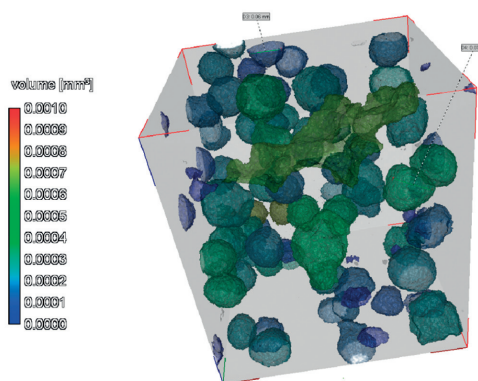
X-ray computed tomography is also applicable in quantitative metallographic studies. An example is the determination of volume fraction of graphite in nodular cast iron. As a result of CT imaging, tomograms of the microstructure of nodular graphite were obtained (Fig. 8). The data collected was used for the numerical volume reconstruction. The result was 3D visualization of the examined object, from which fragments were selected for analysis as shown in Figure 9. The size distribution of the graphite particles in the fragment examined is shown in Figure 10 [2].



Rys. 8. Wybrany tomogram obrazujący mikrostrukturę z grafitem sferoidalnym
 Fig. 8. Selected tomogram showing the microstructure of cast iron with nodular graphite



Rys. 9. Wizualizacja 3D próbki z obszarem poddanym analizie
 Fig. 9. 3D visualization of sample with the area subjected to analysis



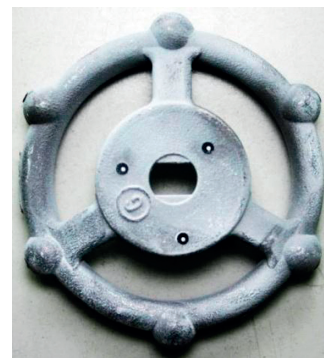
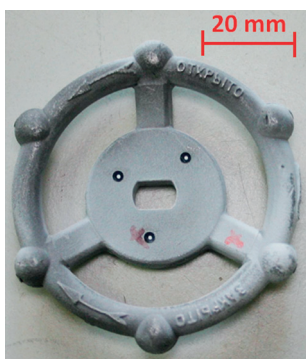
Rys. 10. Rozkład wielkości cząstek grafitu analizowanego fragmentu
 Fig. 10. The size distribution of graphite particles in the examined fragment

Wyniki badań tomograficznych zostały porównane z badaniami metalografii klasycznej, przy użyciu mikroskopu świetlnego. Różnica w uzyskanych wynikach przestrzennej analizy mikroobjętości była nieznaczna (około 1%) i mieściła się w granicach błędu pomiarowego. Wyniki te potwierdziły słuszność zastosowania tomografii komputerowej w badaniach struktury.

Kolejnym przykładem wykorzystania rentgenowskiej tomografii komputerowej są procesy szybkiego prototypowania (RP) i inżynierii odwrotnej (RE). Często odtworzenie geometrii obiektów fizycznych z wykorzystaniem tradycyjnych technik pomiarowych jest trudne i bardzo czasochłonne. Odwzorowanie kształtów, wymiarów elementów i wewnętrznej struktury wykonano na odlewie ze stopu aluminium (rys. 11) [4, 8]. Środowisko pracy oprogramowania CT umożliwiło konwersję danych do formatu STL (*Standard Triangulation Language*). Przygotowana w ten sposób sieć trójkątów stanowiła model obiektu rzeczywistego, który można porównać z modelem konstrukcyjnym CAD lub dwoma takimi samymi modelami, np. otrzymanymi przez skanowanie różnymi metodami. Wynikiem porównania była kolorowa mapa odchyłek, która poglądowo przedstawia odchyłki dużej liczby punktów pomiarowych. Dodatkowo została wzbogacona o punkty inspekcyjne przedstawiające liczbowo odchyłki od nominału (rys. 12).

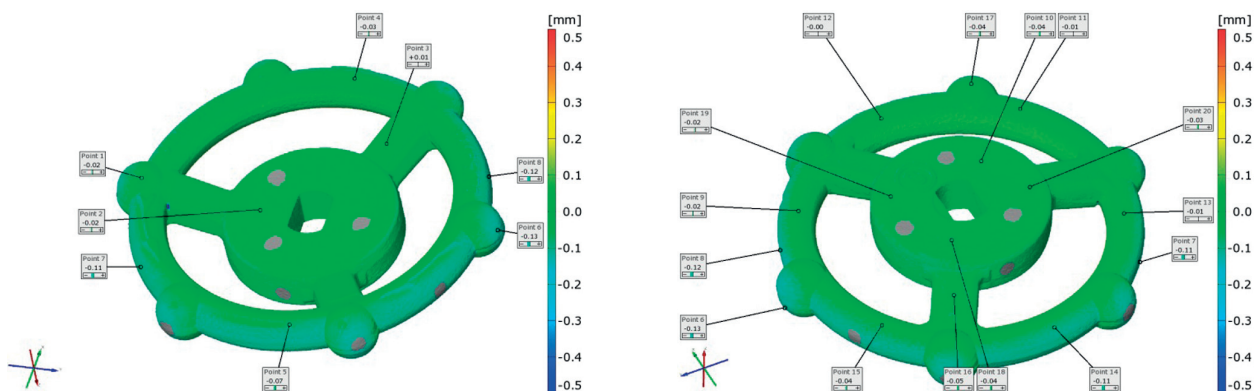
The results of CT were compared with standard metallography using a light microscopy. The difference in the obtained results of spatial analysis of microvolume was negligible (about 1%) and was contained within the limits of measurement error. These results have confirmed the validity of the use of computed tomography in structure examinations.

Another example of the use of X-ray computed tomography is in the processes of rapid prototyping (RP) and reverse engineering (RE). Mapping the geometry of physical objects using traditional measurement techniques is often difficult and time consuming. Mapping shapes and dimensions of elements and the internal structure was made on an aluminium alloy casting (Fig. 11) [4, 8]. The operating environment of CT software enabled data conversion into STL format (*Standard Triangulation Language*). Thus, the prepared network of triangles has created a model of the real object, which could be compared with CAD design or two other identical models obtained by e.g. various techniques of scanning. The result of the comparison was a colour map of deviations, which illustratively shows the deviations of a large number of measuring points. Additionally, it has been enhanced with a number of inspection points showing deviations from the nominal values (Fig. 12).



Rys. 11. Próbkę ze stopu aluminium poddana badaniom tomograficznym

Fig. 11. Aluminium alloy sample subjected to CT scan



Rys. 12. Wynik porównania modelu wzorcowego z modelem uzyskanym metodą CT

Fig. 12. Standard model vs CT model

4. Podsumowanie

Przedstawione przykłady zastosowania rentgenowskiej tomografii komputerowej ukazują szerokie możliwości jej wykorzystania, jako wsparcie metod niszczących, a niejednokrotnie zastępując je. Rentgenowska tomografia CT, podobnie jak zwykła radioscopia, jest nieniszczącą metodą badania. Przewagą jej jest to, że oprócz radiogramów, na których otrzymujemy wszystkie warstwy na jednym zdjęciu, możemy również dokonać rekonstrukcji komputerowej. W efekcie, dzięki specjalnym oprogramowaniom komputerowym, uzyskujemy przekroje 2D poszczególnych warstw, obrazy 3D oraz możliwość utworzenia animacji. Dzięki tym zabiegom komputerowym otrzymujemy informację o wewnętrznej strukturze obiektu, w tym również morfologii nieciągłości wewnętrznych i umiejscowieniu ich w przestrzeni obiektu oraz o jego geometrii. Otrzymane dane można poddać obróbce, aby mogły posłużyć do dalszych badań.

Nie ma jednak metody doskonałej, metoda CT posiada ograniczenia w przypadku badań materiałów o dużej gęstości lub sporej grubości ścianki. Wynikają one ze specyfiki urządzenia (stopnia absorpcji promieniowania rentgenowskiego przez materiał). Niemniej niejednokrotnie wykonywanie badań tomograficznych na przykład podczas opracowywania nowych technologii odlewniczych czy kontroli jakości może wielokrotnie zminimalizować koszty i czas produkcji. Ponadto umożliwia tworzenie danych do wytwarzania lub kopiowania wyrobów, np. w systemach *Rapid-Prototyping*.

Podziękowania

Publikacja zrealizowana na podstawie wyników badań prowadzonych w ramach różnych prac statutowych Instytutu Odlewnictwa finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (między innymi: zlec. 4010/01, zlec. 3019/00, zlec. 1012/00) oraz projektu międzynarodowego niewspółfinansowanego (nr 721/N-NICKEL/2010/0).

Literatura/References

1. Falęcki, Z. (1997). *Analiza wad odlewów*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
2. Tchórz, A., Boroń, Ł. (2013). Ilościowa charakterystyka 3D morfologii grafitu w żeliwie sferoidalnym przy użyciu rentgenowskiej tomografii komputerowej. [W:] *Prace Szkoły Inżynierii Materiałowej*, red. J. Pacyna. Kraków-Krynica, 392–395.
3. Ratajczyk, E. (2012). Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 16(5), 104–113.
4. Tchórz, A., Książek, M. (2014). *Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w inżynierii materiałowej*. VIII Międzynarodowa Konferencja. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich Oddział w Gorzowie Wlkp.
5. <http://www.ge-mcs.com> [dostęp: 14.05.2015].

4. Summary

The examples of the use of X-ray computed tomography show wide possibilities of its application as a tool supporting the destructive methods, and sometimes replacing them. X-ray CT like ordinary radioscopia is a non-destructive test method. Its advantage is that in addition to radiographs where all layers are shown in a single image, a computer reconstruction is also possible. Thus, owing to special computer programs, it is possible to obtain 2D sections of the individual layers, then 3D images and also create an animation. Due to these computer-supported operations we receive information about the internal structure of the object, including the morphology of internal discontinuities, their location within the object space, and object geometry. The collected data can be processed to serve for further testing.

Unfortunately, no method is perfect, and that is why CT also has its limitations, mainly with regards to testing of materials and products characterized by high density and thick walls. The limitations result from the specific character of the device (the degree of absorption of X-rays by the examined material). Nevertheless, quite often computed tomography applied to new casting technologies and quality control methods can minimize substantially the cost and time of production. It also enables creating the data used in product manufacture or copying e.g. in *Rapid-Prototyping* systems.

Acknowledgements

This text has been based on the results of studies carried out under different statutory works of the Foundry Research Institute funded by the Ministry of Science and Higher Education, including commissioned researches nos. 4010/01, 3019/00 and 1012-1000, and a non co-funded international project No. 721/N-NICKEL/2010/0.

6. Krzak, I., Jaśkowiec, K., Tchórz, A., Boroń, Ł. (2015). Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej do porównania metody niskociśnieniowego odlewania przeciwważeniowego i metody odlewania grawitacyjnego. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute*, 55(1), 11–21.
7. Pirowski, Z. (2013). Stopy niklu jako nowoczesne tworzywo odlewnicze do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacji. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
8. Tchórz, A., Gil, A. (2014). Porównanie wyników badań metrologicznych uzyskanych za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej i skanera optycznego 3D. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute*, 54(4), 63–75.