

## Tomograficzna ocena jakości odlewów ze stopu Haynes 282

### Quality check of H282 castings by Computed Tomography (CT) technique

Izabela Krzak<sup>1\*</sup>, Adam Tchórz<sup>1</sup>, Zenon Pirowski<sup>1</sup>, Krzysztof Jaśkowiec<sup>1</sup>, Małgorzata Grudzień<sup>1</sup>,  
Robert Purgert<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

<sup>2</sup>Energy Industries of Ohio, Cleveland, OH 44131, USA

<sup>1</sup>Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

<sup>2</sup>Energy Industries of Ohio, Cleveland, OH 44131, USA

\*Corresponding author: [izabela.krzak@iod.krakow.pl](mailto:izabela.krzak@iod.krakow.pl)

Received: 11.06.2018. Accepted in revised form: 28.02.2019.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.17

#### Streszczenie

W ramach prac projektu międzynarodowego realizowanego w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie we współpracy z Energy Industries of Ohio opracowano technologię topienia w otwartym piecu indukcyjnym i grawitacyjnego odlewania nadstopów niklu. Dotychczas nadstopy te stosowane były wyłącznie jako przerabiane plastycznie.

Do kontroli jakości wykonanych odlewów ze stopu Haynes 282 (H282) zastosowano między innymi rentgenowską tomografię komputerową (ang. Computed Tomography, CT). Jest to metoda nieniszcząca, która łączy badania rentgenowskie z zaawansowaną technologią komputerową.

W niniejszej pracy zaprezentowano wybrane przykłady uzyskanych wyników badań zrealizowanych za pomocą rentgenowskiego tomografu komputerowego firmy GE Phoenix typu v/tome/x I-450 będącego na wyposażeniu Instytutu Odlewnictwa. Wszystkie operacje związane z obróbką danych z CT były wykonywane za pomocą oprogramowania datos/x - reconstruction i VGStudio Max 2.0.

**Słowa kluczowe:** rentgenowska tomografia komputerowa CT, nieciągłości strukturalne, nadstopy niklu, Haynes 282

#### Abstract

As a part of the international project carried out at the Foundry Research Institute in Krakow in cooperation with Energy Industries of Ohio, an open induction furnace melting technology and gravity casting of nickel superalloys have been developed. These alloys have been processed plastically so far.

Quality control of Haynes 282 alloy (H282), was made with X-ray computed tomography (CT). CT is a non-destructive method that combines X-ray examinations with advanced computer technology.

Selected results of the research obtained from the X-ray computer tomograph have been presented in the paper. Research were made by using the GE Phoenix v/ tome/x I-450 tomograph type belonging to the Foundry Research Institute equipment. All operations related to the processing of CT data were performed using the datos/x-reconstruction and VGStudio Max 2.0 software.

**Keywords:** X-ray computed tomography (CT), structural discontinuity, nickel superalloys, Haynes 282

### 1. Wprowadzenie

Do kontroli występowania nieciągłości strukturalnych w odlewach ze stopu Haynes 282 wykorzystano technikę rentgenowskiej tomografii komputerowej. Za pomocą opracowanej technologii topienia i odlewania nadstopów

### 1. Introduction

The X-ray computed tomography technique has been used to control of the structural discontinuities occurrence in the Haynes 282 alloy castings. Technology of melting and casting of nickel superalloys allowed

niklu wykonano odlewy elementów przeznaczonych do pracy w wysokiej temperaturze, powyżej 760°C.

Dobrą jakość tych odlewów potwierdziła przeprowadzona rentgenowska analiza tomograficzna. Stwierdzone wady wewnętrzne odlewów wytworzonych na wstępnym etapie opracowywania procesu technologicznego nie wystąpiły już przy jego dopracowaniu.

## 2. Materiał i metodyka badań

Większość komponentów działających maszyn i urządzeń wykonanych jest ze stopów przetwarzanych przez kosztowne operacje obróbki metalu (przeróbka plastyczna, spawanie, obróbka ubytkowa). Analiza dostępnej literatury, przeprowadzona w ramach realizacji Projektu Międzynarodowego Niewspółfinansowanego pt. „Określenie wpływu procesu technologicznego na jakość odlewów z nadstopów niklu dla potrzeb energetyki, chemii i motoryzacji” oraz w ramach projektu pt. „Konwersja technologiczna stopów niklu pracujących w ekstremalnych warunkach”, w ramach konkursu TANGO 2 [1,2], wykazała, że stosowanie technologii odlewania do wytwarzania części ze stopów niklu stwarza wiele trudności. Stopy niklu należą do grupy materiałów najbardziej odpornych na zużycie w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych (wysoka temperatura, agresywne chemicznie środowisko, długotrwałe i cyklicznie zmienne naprężenia oraz zużycie tribologiczne).

W ramach realizacji prac projektu międzynarodowego wyprodukowano odlewniczy stop niklu z grupy Haynes, który w temperaturze powyżej 950°C wykazał lepsze właściwości mechaniczne ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$ ,  $A$ ) od analogicznego stopu poddanego przeróbce plastycznej. Zakres tej pracy obejmował między innymi badania naukowe prowadzone na stopie niklu H282 oraz wykonanie odlewów kształtowych z tego stopu, przeznaczonych do eksploatacji.

to obtain cast elements destined for high temperature work, above 760°C.

The good quality of these casting was confirmed by the X-ray tomographic analysis. Internal defects found in the cast produced at the initial stage of the technological process development did not occur during its refinement.

## 2. Material and research methodology

Most of operating components in machines and equipment are made from alloys processed by the costly metalworking operations (plastic working, welding, waste machining). Analysis of the available literature, carried out as a part of the International Project Non-co-financed entitled “Determination of the impact of the technological process on the quality of casts from nickel super alloys for the needs of energy, chemistry and automotive industry” and as a part of the project entitled “Technological conversion of nickel alloys working in extreme conditions”, as a part of the TANGO 2 competition [1,2], have shown that the use of casting technology in the manufacture of components from nickel alloys spawns a lot of difficulty. Nickel alloys belong to the group of most resistant materials when used under the extreme operating conditions (high temperature, aggressive chemical environment, long-term and cyclically variable stresses and tribological wear).

As a part of the international project, the nickel alloy from the Haynes group was produced, which in the temperature above 950°C showed better mechanical properties ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$ ,  $A$ ) from the analogous alloy subjected to plastic working. The scope of this work included, among others, research conducted on Haynes 282 nickel alloys and execution of shaped castings from this alloy, intended for use.



Rys. 1. Rentgenowski tomograf komputerowy firmy GE Phoenix typu v/tome/x I-450

Fig. 1. GE Phoenix type v/tome/x I-450X-ray computer tomograph

Ze stopu H282 wykonano odlewy elementów palnika gazowego DN100 (dysza i końcówki dyszy) i poddano je szerokim badaniom kontrolnym. Jednym z nich były badania metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej na urządzeniu znajdującym się na wyposażeniu Instytutu Odlewnictwa (rys. 1).

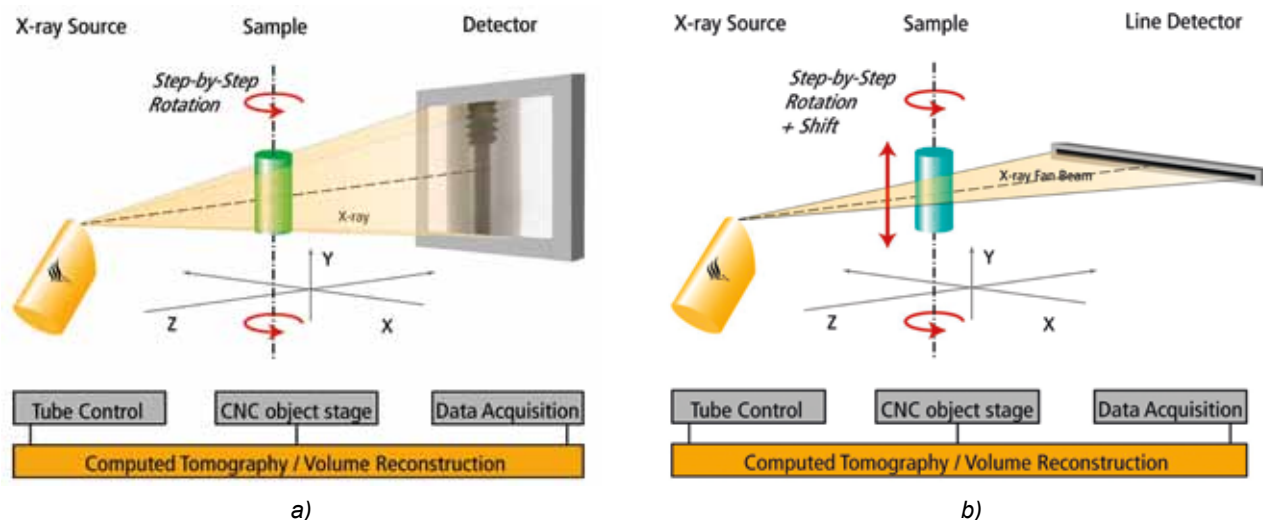
Przeprowadzona analiza tą metodą pozwoliła wykażać nieciągłości wewnętrzne odlewów, a także wybrać optymalną technologię ich wytwarzania.

Zasada tomografii komputerowej oparta jest na rejestrowaniu przez detektor stopnia osłabienia wiązki promieniowania przechodzącej warstwowo przez badany obiekt, przy czym każda warstwa jest skanowana przez układ lampa rentgenowska–detektor pod wieloma kątami. Metoda CT wykorzystuje wiązkę stożkową (rys. 2a) lub liniową (rys. 2b) promieniowania X. Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku, podczas prześwietlania próbka jest obracana o  $360^\circ$  skokowo w małych krokach ( $0,25-0,5^\circ$ ) wokół jednej osi obrotu. W efekcie otrzymuje się obrazy jednowymiarowe, które zawierają informację o stopniu absorpcji promieniowania przez obiekt. Następnie program matematycznej obróbki pozwala stworzyć obrazy pochłanianego promieniowania w wielu płaszczyznach. W ten sposób powstają zdjęcia warstwowe tzn. tomogramy, dające obraz danego obiektu, z którego uzyskujemy obraz trójwymiarowy. Obraz taki można podzielić na wirtualne plastry umożliwiające analizę badanego obiektu pod wieloma kątami [3,4,5]. Dzięki temu 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.

Gas burner DN100 (nozzle and nozzle tip) have been made from the H282 alloy during the casting process. Elements were tested with extensive control tests. One of them was X-ray computed tomography on a device found in the Foundry Research Institute (Fig. 1).

Conducted analysis allows for demonstration of internal discontinuities of castings, as well as, for choice of the optimal technology for their manufacture.

The computed tomography method is based on detector recording the deflection degree of the X-ray radiation passing in layers through the studied object, while each layer is scanned by an X-ray lamp-detector system from many angles. The CT method uses a cone-shaped X-ray beam (Fig. 2a) or a fan-shaped X-ray beam (Fig. 2b). In both cases, the scanned object is rotated in small steps ( $0.25-0.5^\circ$ ) by  $360^\circ$  around one axis of rotation. As a result, one-dimensional images are obtained that contain information about the radiation degree absorbed by the object. Then the mathematical processing program allows for creation of an images of absorbed radiation in many planes. In this way, layered photos are created, i.e. tomograms, giving a picture of a given object as a three-dimensional image. This image can be divided into virtual slices enabling analysis of the examined object from multiple angles [3,4,5]. Thanks to this, we obtain information about the elements of the internal structure of the examined material, including the morphology of internal discontinuities and their location in space. Additionally, it is possible to precisely determine the dimensions of the object, both externally and internally.



Rys. 2. Schemat działania tomografu [6]: a) z wiązką stożkową, b) z wiązką płaską  
Fig. 2. Schematic CT operation [6]: a) with cone beam, b) with fan beam

### 3. Wyniki badań

Badaniom nieniszczącym metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej poddano dwie dysze palnika gazowego DN100 ze stopu H282 przeznaczone do wygrzewania kadzi rozlewniczej odlane dwoma różnymi technologiami: technologią zalewania przez nadlew i technologią z syfonowym układem wlewowym, co przedstawiono na [rysunku 3](#).



Rys. 3. Dwa warianty technologiczne (symulowane w programie MAGMA) odlewania dyszy palnika gazowego ze stopu H282 [2]: a) technologia zalewania przez nadlew, b) technologia z syfonowym układem wlewowym

Fig. 3. Two technological variants (simulated in the MAGMA program) for the nozzle of the gas burner H282 alloy [2]: a) pouring technology from the top through a riser, b) filling technology from the bottom casting

Uzyskane wyniki posłużyły do określenia nieciągłości wewnętrznych w badanych dyszach. W tym celu wykonano skanowanie przy następujących parametrach ekspozycji: napięcie prądu  $U = 440$  kV, natężenie prądu  $I = 500$   $\mu$ A, czas naświetlania  $T = 1000$  ms i wielkość woksela = 150  $\mu$ m. Wszystkie operacje związane z obróbką danych z CT były wykonywane za pomocą oprogramowania *datos|x - reconstruction* oraz *VGStudio Max 2.0*.

W wyniku przeprowadzonych badań tomograficznych w dyszy zalewanej przez nadlew ujawniono nieciągłości wewnętrzne materiału, co obrazują [rysunki 4–6](#). Wyniki te potwierdziły poprawność przeprowadzonej wcześniej analizy numerycznej opracowanej symulacji komputerowej odlewania wirtualnego ([rys. 7](#)). W dyszy zalewanej syfonowo takich nieciągłości nie stwierdzono ([rys. 8](#)).

Przeprowadzona komputerowa analiza tomograficzna odlewów testowych pozwoliła zatem wybrać optymalną technologię topienia i odlewania odlewów kształtowych z nadstopu niklu H282. Wykonane wybraną technologią odlewy wykazują wystarczająco dobrą jakość dla tego typu elementów.

### 3. Results of the tests

Non-destructive X-ray computed tomography tests were performed on two nozzles of the DN100 gas burner from the H282 alloy designed for heating in the casting ladle, casted with two different technologies: pouring from the top through a riser and the second one with filling from the bottom casting, as shown in [Figure 3](#).

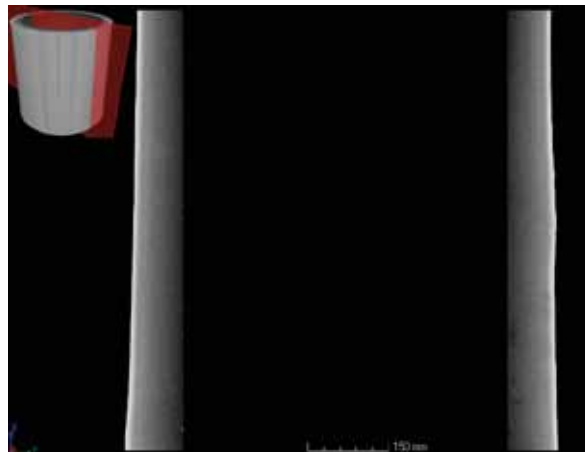
The produced results were used to determine internal discontinuities in the tested nozzles. For this purpose, a scan was carried out with the following exposure parameters: voltage  $U = 440$  kV, current  $I = 500$   $\mu$ A, exposure  $T = 1000$  ms and voxel size = 150  $\mu$ m. All operations related to the data processing from CT were performed *datos|x reconstruction* and *VGStudio Max 2.0* software.

As a result of performed tomographic examinations in the pouring technology nozzle, internal discontinuities of the material in the form of porosity were revealed, as illustrated in [Figures 4–6](#). These results confirmed the correctness of the previously performed numerical analysis of the computer simulation of virtual casting ([Fig. 7](#)). In the filling technology nozzle, such discontinuities were not found ([Fig. 8](#)).

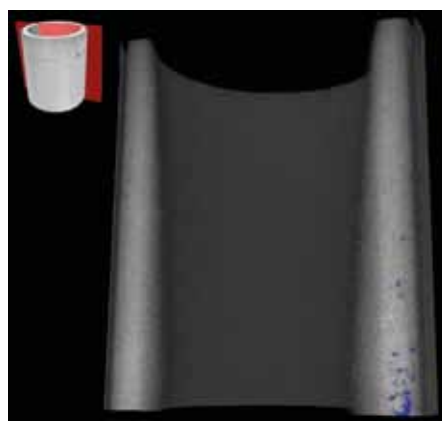
The computer tomographic analysis of the test casts, enabled for selection of the optimal technology for melting and casting of a shaped cast from the H282 nickel superalloy. The casts made with the chosen technology show enough good quality for this type of elements.



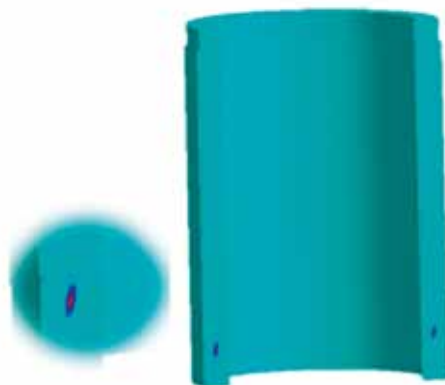
*Rys. 4. Wybrany przekrój przedstawiający badaną dyszę zalewaną przez nadlew*  
*Fig. 4. Selected section showing the tested nozzle pouring technology from the top through a riser*



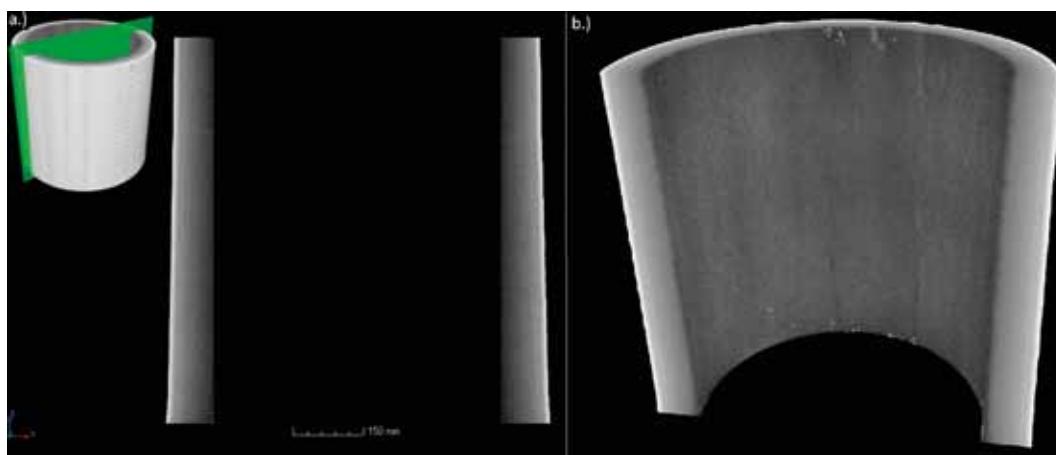
*Rys. 5. Wybrany przekrój przedstawiający badaną dyszę zalewaną przez nadlew*  
*Fig. 5. Selected section showing the tested nozzle pouring technology from the top through a riser*



*Rys. 6. Wybrany widok przestrzenny obrazujący przekrój badanej dyszy zalewanej przez nadlew*  
*Fig. 6. Selected spatial view showing the cross-section of the tested nozzle pouring technology from the top through a riser*



Rys. 7. Wirtualny odlew dyszy zalewanej przez nadlew po przeprowadzonej analizie numerycznej [2]  
Fig. 7. Virtual cast of the pouring technology nozzle after a numerical analysis [2]



Rys. 8. Badana dysza zalewana syfonowo: a) wybrany przekrój, b) widok przestrzenny wybranego przekroju  
Fig. 8. The tested nozzle filled from the bottom casting: a) selected section, b) spatial view of the selected section

#### 4. Podsumowanie

Opracowana technologia topienia i odlewania nadstopów niklu Haynes 282, dotychczas stosowanego wyłącznie po przeróbce plastycznej, pozwoliła wykonać odlewy elementów przeznaczonych do pracy w wysokiej temperaturze (powyżej 760°C). Ograniczono tym samym w znacznym stopniu kosztowną obróbkę ubytkową.

Dobrą jakość wykonanych odlewów potwierdziła przeprowadzona rentgenowska analiza tomograficzna, a stwierdzone wady wewnętrzne odlewów wytworzonych na wstępnym etapie opracowywania procesu technologicznego nie wystąpiły już przy jego dopracowaniu.

Wykonane wybraną technologią odlewy wykazują wystarczająco dobrą jakość dla tego typu elementów. Wykonanie ich ze stopu dotychczas przeznaczonego wyłącznie do przeróbki plastycznej jest użytecznym rezultatem realizowanej pracy. Egzemplarze prototypowe wykonanych dysz odlewanych ze stopu Haynes 282 przekazano do eksploatacji.

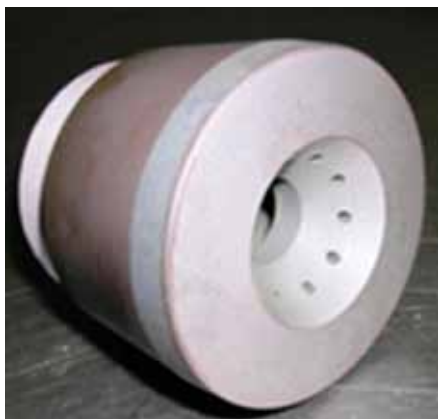
#### 4. Summary

The developed technology of melting and casting Haynes 282 nickel superalloys, used only after plastically processing so far, allowed for obtaining casting elements designed for high temperature working (over 760°C). Costly waste treatment has been reduced in this way.

The good quality of castings was confirmed by the X-ray tomography analysis, and found internal defects of the castings fabricated at the initial stage of developing the technological process, did not occur during its refinement.

The castings made with the chosen technology show good quality for this type of elements. Manufacturing these components from an alloy designed so far solely for the plastic working was a utilitarian result of the undertaken studies. The prototype samples of the nozzles made of Haynes 282 alloy were put into operation.

Techniką topienia w otwartym piecu indukcyjnym i odlewania grawitacyjnego stopu H282 wykonano również inne odlewy, których przykłady zamieszczono na rysunku 9.



The melting technique in the open induction furnace and the gravitational casting of the H282 alloy were also used for manufacturing of other casts. Examples are shown in Figure 9.



Rys. 9. Przykładowe odlewy ze stopu Haynes 282  
Fig. 9. Exemplary castings from the Haynes 282 alloy

## Podziękowania

Publikacja została zrealizowana na podstawie wyników projektu badawczego: Projekt Międzynarodowy Niewspółfinansowany nr 721/N-NICKEL/2010/0 pt. „Określenie wpływu procesu technologicznego na jakość odlewów z nadstopów niklu dla potrzeb energetyki, chemii i motoryzacji”, w ramach projektu pt. „Konwersja technologiczna stopów niklu pracujących w ekstremalnych warunkach”; numer umowy: TANGO2/340100/NCBR/2017; akronim NICKEL; realizacja w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia Narodowego Centrum Nauki i Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – TANGO 2.

## Acknowledgements

The publication was based on the results of the research project: International Project Non-co-financed No. 721/ N-NICKEL/2010/0 entitled “Determination of the impact of the technological process on the quality of casts from nickel super alloys for the needs of energy, chemistry and automotive industry”, as part of the project entitled “Technological conversion of nickel alloys working in extreme conditions”; contract number: TANGO2/340100/NCBR/2017; the acronym NICKEL; implementation within the Joint Undertaking of the National Science Center and the National Center for Research and Development – TANGO 2.

## Literatura/References

1. Pirowski Z. 2017. *Kompendium wiedzy o 269 stopach niklu. Podstawowe dane materiałowe*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
2. Pirowski Z. 2013. *Stopy niklu jako nowoczesne tworzywo odlewnicze do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacji*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
3. Ratajczyk E. 2012. „Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych”. *Pomiary, Automatyka, Robotyka* 16 (5) : 104–113.
4. Tchórz A., M. Książek. 2014. Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w inżynierii materiałowej. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich Oddział w Gorzowie Wlkp. VIII Międzynarodowa Konferencja.
5. Krzak I., A. Tchórz. 2015. „Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej do wspomagania badań materiałowych odlewów / The use of X-ray computed tomography as a tool in assisting cast material testing”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 55 (3) : 33–42.
6. <http://www.ge-mcs.com>.

