

**Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej do porównania metody niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego i metody odlewania grawitacyjnego**

**Application of X-ray computed tomography to compare gravity casting to counter-gravity low-pressure air-melted process**

*Izabela Krzak<sup>1</sup>, Krzysztof Jaśkowiec<sup>2</sup>, Adam Tchórz<sup>1</sup>, Łukasz Boroń<sup>3</sup>*

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

<sup>2</sup>*Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

<sup>3</sup>*Instytut Odlewnictwa, Zespół Laboratoriów Badawczych, Laboratorium Badań Struktury i Właściwości, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

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

<sup>2</sup>*Foundry Research Institute, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

<sup>3</sup>*Foundry Research Institute, Complex of Accredited Research Laboratories, Laboratory for Structure Analysis and Mechanical Testing, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

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

**Streszczenie**

Celem niniejszej pracy była ocena struktury wewnętrznej odlewów zbliżonych do AISi9Mg (EN AC-43300), wykonanych metodą niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego w atmosferze powietrza – CLA (Counter-gravity Low-pressure Air-melted – powietrzne, niskociśnieniowe odlewanie przeciwgrawitacyjne) oraz metodą grawitacyjną. Metodę rentgenowskiej tomografii komputerowej – CT (Computed Tomography) w połączeniu z badaniami strukturalnymi i mechanicznymi, zastosowano do oceny jakości odlewów wytworzonych wyżej wymienionymi technikami.

Nieciągłości strukturalne odlewów wykonanych metodą CLA i metodą grawitacyjną zbadano, analizując wyniki prześwietlania przemysłowym tomografem komputerowym firmy Phoenix X-ray. Przykładowo przedstawiono je w postaci wybranych przekrojów (2D) i w wizualizacji przestrzennej (3D). Z uwagi na fakt, że same badania tomograficzne okazały się niewystarczające, dla porównania jakości odlanych próbek różnymi technikami, przeprowadzono badanie mikrostruktury z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego oraz wykonano statyczną próbę rozciągania próbek w temperaturze otoczenia.

**Abstract**

The purpose of this paper is to evaluate the internal structure of alloys similar to AISi9Mg (EN AC-43300), made with the counter-gravity low-pressure air-melted process (CLA) and with the gravity casting process. The X-ray computed tomography (CT) examination method was combined with structural and mechanical testing for a qualitative evaluation of the castings produced with these processes.

The structural discontinuities in CLA and gravity castings were investigated by studying the imaging made with an industrial-grade CT scanner manufactured by Phoenix X-ray. The examples of images are shown on selected cross-sections (2D) and by 3D visualisation. The CT examination proved to be insufficient for a qualitative comparison of castings produced with different techniques; hence a microstructural examination was carried out under an optical microscope and a static tensile test was completed on the samples at ambient temperature.

*Keywords:* counter-gravity low-pressure air-melted casting (CLA), X-ray computed tomography (CT), structural discontinuities

**Słowa kluczowe:** niskociśnieniowe odlewanie przeciwgrawitacyjne (CLA), rentgenowska tomografia komputerowa (CT), nieciągłość strukturalna

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym warunkiem umożliwiającym stosowanie metody niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego (CLA) jest zastosowanie form ceramicznych o odpowiedniej gazoprzepuszczalności wykonywanych techniką wytapianych modeli. Formę taką umieszcza się w komorze próżniowej z otwartym układem wlewowym skierowanym w dół. Do układu wlewowego przymocowuje się rurkę z materiału ogniotrwałego. Następnie uszczelniona komora opuszczana jest do ciekłego stopu roztopionego w tyglu pieca indukcyjnego, na wyznaczoną doświadczalnie głębokość zanurzenia rury. W wyniku działania podciśnienia w komorze formy, stop zasysany jest z tygla do układu wlewowego, wypełniając stopniowo wnękę formy. Po zakrzepnięciu zassanego metalu, próżnia zostaje „usunięta”, a nadmiar ciekłego stopu z układu wlewowego sphywa do pieca. W efekcie pozostają tylko krótkie odgałęzienia układu zasilającego przy poszczególnych odlewach, usuwane przez szlifowanie. Unika się dzięki temu mechanicznego usuwania układu wlewowego. Warto zaznaczyć, że do wytwarzania odlewów tą metodą wykorzystywane jest 60–90% zakrzepniętego metalu w formie. W metodzie grawitacyjnej natomiast w przypadku odlewania precyzyjnego większość masy roztopionego metalu pozostaje w układzie wlewowym. Wykorzystywane jest wówczas tylko 15–50% ciekłego stopu. Inną zaletą metody CLA jest możliwość dwu- do trzykrotnego zwiększenia upakowania modeli woskowych na wlewie głównym, w odróżnieniu od tradycyjnego procesu grawitacyjnego, co dodatkowo zwiększa uzysk [1,2].

Procesy niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego pozwalają otrzymywać odlewy cienkościennie. Przykładem może tu być metoda CLV (*Counter-gravity Lowprocess Vacuum* – niskopróżniowy proces topienia i przeciwgrawitacyjnego odlewania), która umożliwia zalanie elementów o grubości ścianki 0,5 mm [3]. Zastosowanie tych metod daje możliwość sterowania wielkością ziarna, a wnętrza formy są wypełniane w sposób nieburzliwy czystym metalem spod powierzchni kąpieli [1]. W efekcie w uzyskanych odlewach spodziewać się można mniejszej ilości żużla i wtrąceń niemetalicznych, które są częstym powodem powstawania nieciągłości w strukturze i przyczyną obniżenia parametrów mechanicznych [2,4].

W technicznej literaturze fachowej można znaleźć obrazy mikrostruktur różnych stopów uzyskanych w procesie niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego [3,5]. Spotyka się też wyniki defektoskopowych badań stopów odlewniczych prowadzonych metodą tomografii komputerowej [6–10]. Jednak w pra-

## 1. Introduction

Application of the CLA (counter-gravity low-pressure air-melted) process is feasible with the use of ceramic moulds of sufficient gas permeability and built by investment casting. A ceramic mould with these characteristics is placed in a vacuum chamber and with its gating system downwards. A tube made of a refractory material is mounted on the gating system. Then the sealed vacuum chamber is submerged into a molten alloy in an induction furnace crucible at the experimentally determined submersion depth of the refractory tube. The vacuum pressure in the mould chamber sucks in the alloy from the crucible into the gating system, which gradually fills the mould cavity. Once the sucked in metal is solidified, the vacuum is removed and the excess of molten alloy flows out of the gating system and down into the furnace. Only the short branches of the feed system remain at individual castings and are removed by grinding. This avoids machining off the gating system. Note that a casting made with this process uses 60–90% of the metal solidified in the mould. The precision gravity casting process leaves the majority of the molten metal mass in the gating system. Only 15–50% of the molten alloy is used. Another advantage of the CLA process is to increase the wax model packing on the main gate by two to three times, unlike in the traditional gravity casting process; this increases the yield further [1,2].

The CLA processes allow producing light section castings. An example is the CLV process (counter-gravity low vacuum), which allows pouring out elements with the section thickness of 0.5 mm [3]. The processes allow controlling the grain size, and the mould cavities are filled without turbulences with pure metal from underneath the metal bath surface [1]. As an effect, the resulting castings are expected to feature less slag or metallic inclusions, which often are the cause of structural discontinuities, resulting in reduced mechanical performance [2,4].

The technical references in this field show microstructural images of various alloys produced by CLA [3,5]. There are also results of CT-based defectoscopic examinations of casting alloys [6–10]. However, these references lack any X-ray CT-based comparison of the CLA cast alloys to the gravity cast alloys.

X-ray computed tomography is an advanced diagnostic method which combines X-ray imaging with advanced computer image processing. X-ray CT uses the composition of object projections made from various directions to make cross-section images (2D and 3D). Not only does the technique allow qualitative evaluation of the examined materials, but also advanced analytical work on the studied objects. The high resolution of X-ray CT can help reveal microstructural defects and evaluate certain characteristics of the microstructure. X-ray CT allows distinction of objects sized 200–300 nm and up

cach tych nie przedstawiono porównań jakości stopów odlewanych metodą CLA z metodą grawitacyjną przy wykorzystaniu rentgenowskiej tomografii komputerowej.

Rentgenowska tomografia komputerowa jest nowoczesną metodą diagnostyczną, która łączy badania rentgenowskie z zaawansowaną technologią komputerową. Wykorzystuje ona złożenie projekcji obiektu wykonanych z różnych kierunków do utworzenia obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D). Pozwala to nie tylko na jakościową ocenę badanego materiału, lecz również umożliwia przeprowadzenie zaawansowanych analiz. Wysoka rozdzielczość tej metody umożliwia ujawnienie wad makrostruktury, jak również pozwala ocenić pewne cechy mikrostruktury. Zapewnia ona rozróżnienie obiektów już o wielkości 200–300 nm z rozdzielczością (woksel<sup>1</sup>) już od 0,5 µm. Dodatkowo umożliwia graficzną rekonstrukcję 3D wyników badań oraz określenie w przestrzeni nieciągłości wewnętrznych [11, 12].

Podczas prześwietlania próbka jest obracana skokowo w małych krokach (0,25–0,5°) o 360° wokół jednej osi obrotu. Wyniki w postaci matrycy punktów są zapisywane w pamięci komputera, a następnie przetwarzane na odpowiedni obraz i ulegają dalszej obróbce komputerowej. W efekcie uzyskujemy informację na temat elementów wewnętrznej struktury materiału, w tym również morfologię nieciągłości wewnętrznych i umiejscowienia ich w przestrzeni.

## 2. Materiał i metodyka badań

W celu porównania procesu niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego CLA z tradycyjną metodą odlewania grawitacyjnego pod kątem ewentualnych nieciągłości strukturalnych, wykonano próbne odlewy z zastosowaniem tych metod. Do badania zastosowano ten sam materiał – nadlewy technologiczne odlewów zbliżonych do AlSi9Mg (EN AC-43300). W eksperymencie założono zbadanie wpływu samej metody CLA na jakość odlewu. Niezastosowano żadnych zabiegów metalurgicznych. Skład chemiczny otrzymanego stopu przedstawiono w tabeli 1. Analizę chemiczną wykonano metodą optycznej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem jarzeniowym na aparacie LECO GDS 850A.

Tabela 1. Skład chemiczny odlanego stopu, % wag.

Table 1. Chemical composition of cast alloy, wt. %

Mg	Si	Zn	Ni	Cu	Fe	Mn	Ti	Al
3,20	7,95	1,25	0,13	0,60	0,25	0,05	0,10	reszta/bal.

Przy wyborze materiału wsadowego kierowano się niską gęstością aluminium, co ułatwia badania tomogra-

<sup>1</sup> Woksel – (voxel – volumetric element) jednostka obrazu przestrzennego 3D (odpowiednik piksela dla obrazu 2D).

at the resolution (voxel<sup>1</sup>) already from 0.5 µm. X-ray CT can also be used for graphical 3D reconstruction of examination results and spatial identification of internal discontinuities [11, 12].

A sample during the X-ray imaging is turned 360° by small increments (0.25–0.5°) around a single axis. The results being a dot matrix are stored in a PC memory and then converted into a suitable image and further digitally processed. The effect gives an insight into the elements of internal structure of the investigated material, complete with a morphology of internal discontinuities and their spatial locations.

## 2. Materials and methodology

In order to compare the CLA process to traditional gravity casting for potential structural discontinuities, test castings were made by applying both production methods. Each casting was made of the same material, i.e. the process riser heads of alloys similar to AlSi9Mg (EN AC-43300). The experiment assumed to investigate the effects of the CLA process on the quality of the casting. No metallurgical treatment was applied. The chemical composition of the produced alloy is shown in Table 1. The chemical analysis was conducted by applying glow discharge atomic emission spectrometry using LECO GDS 850A.

The selection criterion for the charge material was the low density of aluminium that facilitates CT exami-

<sup>1</sup> Voxel (volumetric element): a unit of 3D image (counterpart to the pixel in 2D images).



ficzne. Dołożono wszelkich starań w celu zapewnienia bezpieczeństwa podczas wytopu, kontrolując temperaturę, skoki ciśnienia i współpracę poszczególnych elementów skonstruowanego stanowiska badawczego.

Wsad wprowadzono do zimnego grafitowego tygla pieca indukcyjnego, a następnie roztopiono i przegrzano metal do temperatury 725°C [13]. W pierwszej kolejności wykonano próby przy zastosowaniu metody odlewania niskociśnieniowego polegające na obniżeniu ciśnienia w rurce szklanej (będącej jednocześnie formą) do wartości pozwalającej na jej wypełnienie do wysokości około 200 mm (rys. 1a). W ten sposób, przy ustabilizowanej temperaturze, wypełniono po kolei trzy rurki szklane, nie wykonując żadnych dodatkowych zabiegów metalurgicznych.

W następnym kroku zastosowano tradycyjną metodę grawitacyjną (rys. 1b). Zalano formy z masy żywicznej „eco2000” [14]. W obu metodach odlewano wałki o średnicy 12 mm, które poddano badaniom tomograficznym, metalograficznym i mechanicznym.

All safety measures were applied to the casting process, i.e. by controlling the temperature, pressure spikes and mating of specific parts within the built test rig.

The charge was introduced into a cold graphite crucible in an induction furnace, melted and superheated to 725°C [13]. First the tests were carried out with the CLA process by lowering the pressure inside a glass tube (being the mould) to a value which enabled filling the tube void to a height of ca. 200 mm (Fig. 1a). In this way and at a stable temperature, three glass tubes were filled in succession, without any additional metallurgical treatment.

The traditional gravity casting process was used in the second stage of the test (Fig. 1b). The poured moulds were made of the “eco2000” resin compound [14]. In both processes cylinders were cast with a diameter of 12 mm and subjected to X-ray CT, metallographic and mechanical testing.



a)



b)

Rys. 1. Zastosowane metody odlewania: a) CLA, b) grawitacyjna

Fig. 1. Applied casting processes: a) CLA, b) gravity casting

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Badania tomograficzne

Odlewy wałków wykonane z zastosowaniem niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego (CLA) i odlewania grawitacyjnego poddano badaniom nieniszczącym w celu ujawnienia nieciągłości wewnętrznych. Badania zrealizowano za pomocą rentgenowskiego tomografu komputerowego typu v|tome|x I-450, będącego na wyposażeniu Instytutu Odlewnictwa. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia porowatości w badanych próbkach. W tym celu wykonano dwa skanowania dla jednego rodzaju próbki, przy parametrach ekspozycji: napięcie  $U = 180$  kV, natężenie prądu  $I = 50$   $\mu$ A i czas naświetlania  $T = 200$  ms. Pierwsze miało na celu określenie rozłożenia porowatości w całej objętości odlewu oraz wytypowanie reprezentatywnych obszarów do

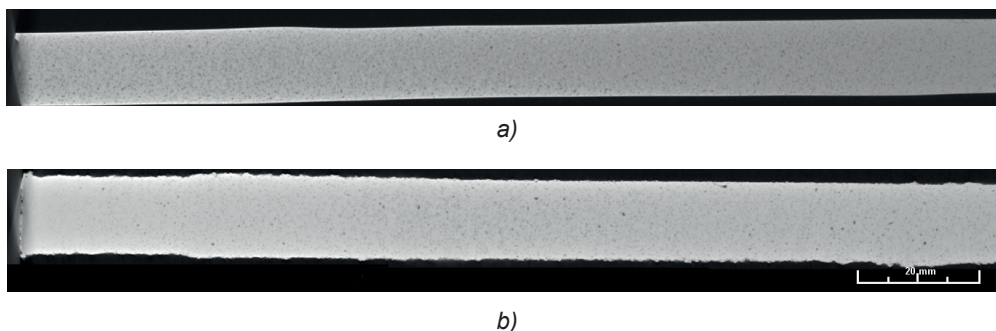
### 3. Test results

#### 3.1. X-ray CT examination

The CLA and gravity cast cylinders were subject to non-destructive testing (NDT) to find potential internal discontinuities. The NDT was made with an X-ray CT machine type v|tome|x I-450, available at the Foundry Research Institute. The produced imaging results were used to assess the porosity of the tested samples. Two scans of each sample type were completed, the exposure parameters: voltage  $U = 180$  kV, current  $I = 50$   $\mu$ A and exposure time  $T = 200$  ms. The first scan was aimed at determining the distribution of porosity across the entire casting volume and selecting the representative areas for further testing and a more thorough analysis of discontinuities. The voxel size was 40.5  $\mu$ m in the samples approx. 170 mm long and

przeprowadzenia kolejnej, ale zarazem wnikliwej analizy tych nieciągłości. Dla rozmiaru próbki o długości około 170 mm i średnicy 12 mm wielkość woksela wynosiła 40,5  $\mu\text{m}$ . Dało to możliwość oceny struktury pod kątem zbadania rozłożenia porowatości w całej objętości próbki. Porównując obrazy struktur odlewów, nie stwierdzono znaczącej różnicy pomiędzy zastosowanymi metodami odlewania. W obu przypadkach zaobserwowano równomiernie rozłożone drobne nieciągłości strukturalne w całym obszarze odlewu (rys. 2).

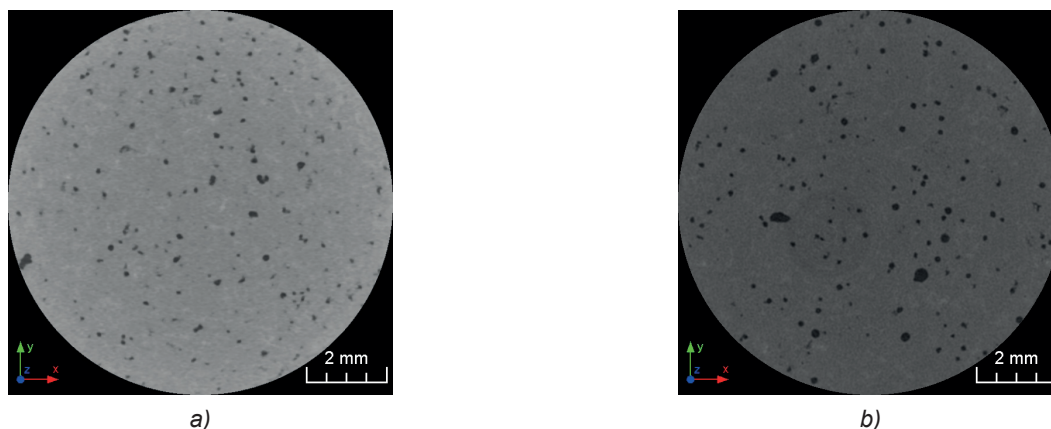
12 mm in diameter. This allowed evaluating the structure for the porosity distribution in the sample volume. A comparison of the casting structure images found no significant difference between both casting processes. A uniform distribution of fine structural discontinuities across the entire area of the casting from both processes was observed (Fig. 2).



Rys. 2. Struktura wewnętrzna wałków odlanych metodą: a) CLA, b) grawitacyjną  
 Fig. 2. Internal structure of the cylinders cast by: a) CLA, b) gravity casting process

Następnie przeprowadzono badania dla mniejszego obszaru próbki z większą rozdzielczością (woksel = 14,7  $\mu\text{m}$ ), w celu wykonania dokładniejszej analizy porowatości. Przykładowe wyniki badań (tomogramy) przedstawiono na rysunku 3. Uzyskane wyniki posłużyły do przeprowadzenia szczegółowej oceny porowatości. Analizowano fragmenty o takich samych rozmiarach: średnicy równej 10 mm i długości równej 7,6 mm. Do obróbki uzyskanych wyników zastosowano oprogramowanie do graficznej analizy obrazu VGStudio Max 2.0 oraz Fiji Is Just ImageJ.

A smaller area of the sample was then examined at a higher resolution (voxel = 14.7  $\mu\text{m}$ ) for a more accurate analysis of porosity. The example examination results (CT scans) are shown in Figure 3. The produced results were used in the detailed porosity evaluation. All fragments analysed had identical dimensions: a diameter of 10 mm and a length of 7.6 mm. The results were processed in VGStudio Max 2.0 and Fiji Is Just ImageJ image analysis software.



Rys. 3. Przekrój 2D fragmentu odlewu wałka: a) metoda CLA, b) metoda grawitacyjna  
 Fig. 3. 2D section of a cylinder casting from: a) CLA, b) gravity casting

Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku wyraźnie da się zauważyć znaczące nieciągłości w strukturze. Procentowy udział porów w badanych próbkach wynosi:

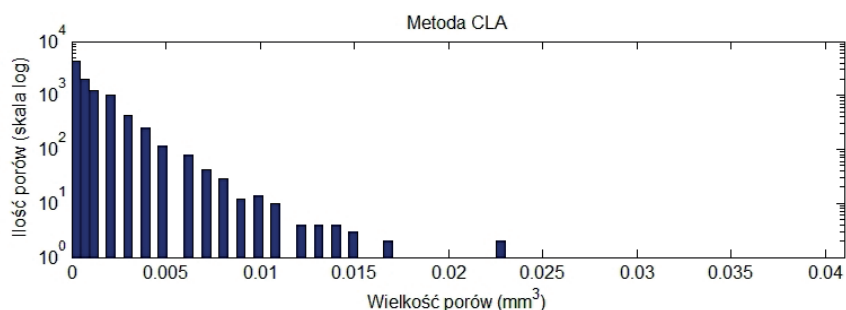
Significant structural discontinuities were found for both casting processes. The percentage share of porosity in the tested samples is as follows: 1.65% for CLA,

w metodzie CLA – 1,65%, a w metodzie grawitacyjnej – 1,73% (tab. 2). Biorąc pod uwagę błąd wynikający z metody pomiarowej i obróbki danych, wartości te są porównywalne. Rozmieszczenie porowatości gazowych w obu próbkach jest w miarę 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 mm<sup>3</sup>, natomiast po odlewaniu grawitacyjnym dochodzi do 0,04 mm<sup>3</sup> (rys. 4). Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wizualizację 3D rozmieszczenia wad w badanych próbkach, wynikającą z porowatości gazowej.

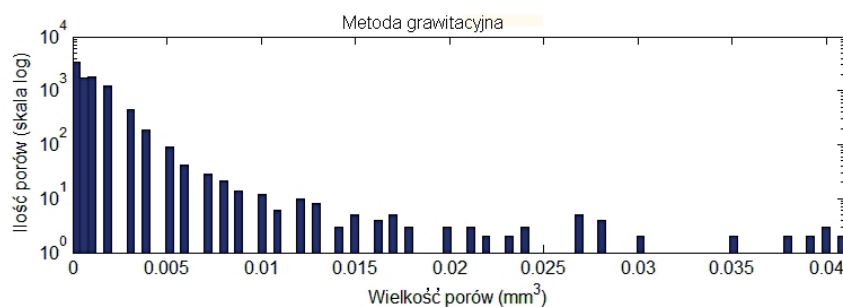
and 1.73% for gravity casting (Table 2). The values are comparable considering the error of the applied measurement method and data processing. The spread of gas porosities in both samples is relatively uniform. It is evident that the gravity cast sample features more spherical pores, whereas the CLA cast sample pores are irregular. Moreover, the latter sample has a mean pore volume lower than in the gravity cast sample. For the CLA process, the volume of the largest structural discontinuity (pore) is less than 0.025 mm<sup>3</sup>, while reaching as much as 0.04 mm<sup>3</sup> in gravity casts (Fig. 4). Figures 5 and 6 show the 3D visualisation of gas porosity defect distribution in the tested samples.

Tabela 2. Zawartość porów analizowanego wycinka próbki odlanej z zastosowaniem metody CLA i metody grawitacyjnej  
Table 2. Porosity content of the studied CLA and gravity cast sample sections

Parametr/Parameter	Metoda CLA / CLA	Metoda grawitacyjna / Gravity casting
Sumaryczna objętość porów, mm <sup>3</sup> / Total pore volume, mm <sup>3</sup>	9,9	10,3
Procentowy udział porów, % obj. / Porosity share, vol. %	1,6	1,7
Objętość losowo analizowanego wycinka próbki, mm <sup>3</sup> / Volume of a random-analysed sample section, mm <sup>3</sup>	597,2	



a)

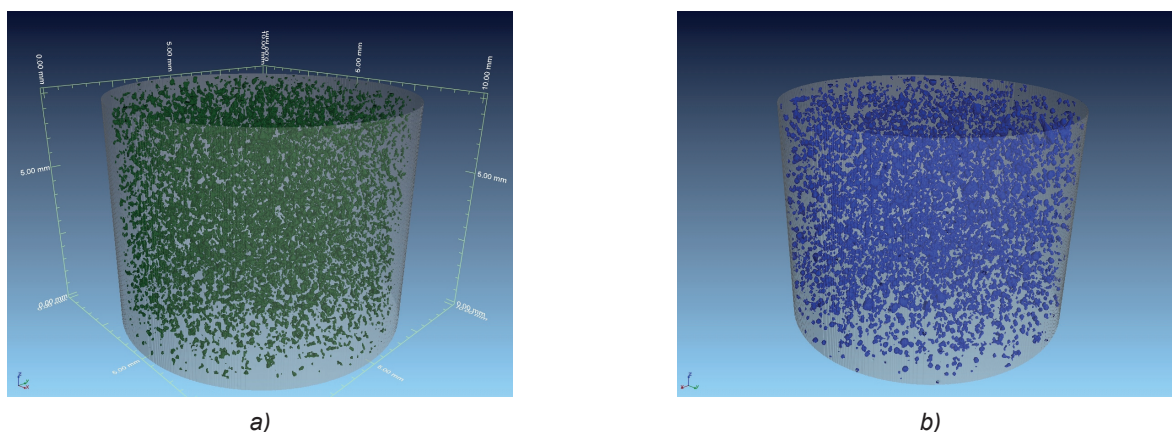


b)

Rys. 4. Porównanie ilości i wielkości porów w odlewach: a) metoda CLA, b) metoda grawitacyjna

Fig. 4. Comparison of the number and size of pores in: a) CLA castings, b) gravity castings



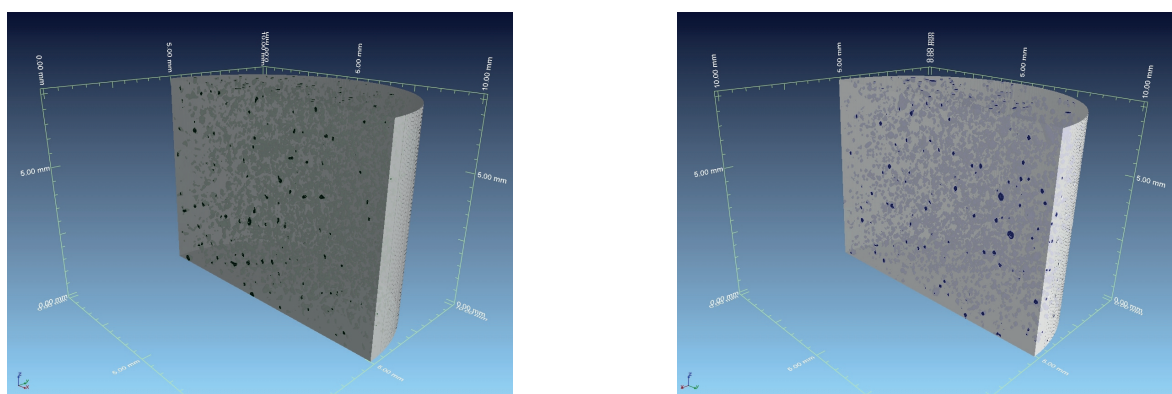


a)

b)

Rys. 5. Rozmieszczenie porowatości gazowej w przestrzeni odlewów: a) metoda CLA, b) metoda grawitacyjna

Fig. 5. Distribution of gas porosity in the casting volume: a) CLA, b) gravity casting



a)

b)

Rys. 6. Przestrzenny przekrój analizowanego fragmentu odlewu wałka: a) metoda CLA, b) metoda grawitacyjna

Fig. 6. 3D cross-section of the studied casting part: a) CLA, b) gravity casting

### 3.2. Badania metalograficzne

Ze względu na ograniczenia zdolności rozdzielczej tomografii komputerowej badania tomograficzne uzupełniono obserwacjami mikrostruktury za pomocą mikroskopu świetlnego Zeiss Axio Observer.Z1m.

Obserwacje oraz zdjęcia mikrostruktury zostały przeprowadzone na zglądach poprzecznych. Próbki do badań zostały wyszlifowane na papierze ściernym o gradacji 220  $\mu\text{m}$ , następnie wypolerowane na pastach diamentowych o kolejnych gradacjach 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$ . W celu ujawnienia mikrostruktury próbki trawiono w odczynniku Mi1Al (0,5 HF, 99,5 H<sub>2</sub>O) wg PN-H-04512:1975 [15].

W przypadku obu metod odlewania w strukturze stopu występują: eutektyka  $\alpha$  oraz wydzielenia Si i fazy Mg<sub>2</sub>Si. Zarówno w próbce odlewanej z wykorzystaniem metody CLA, jak i metody grawitacyjnej ujawniono dużą ilość porowatości gazowych. Można jednak zaobserwować, że w próbce odlewanej grawitacyjnie porowatości gazowe mają kształt bardziej kulisty, co stwierdzono również za pomocą analizy obrazu tomograficznego. Średnica

### 3.2. Metallographic tests

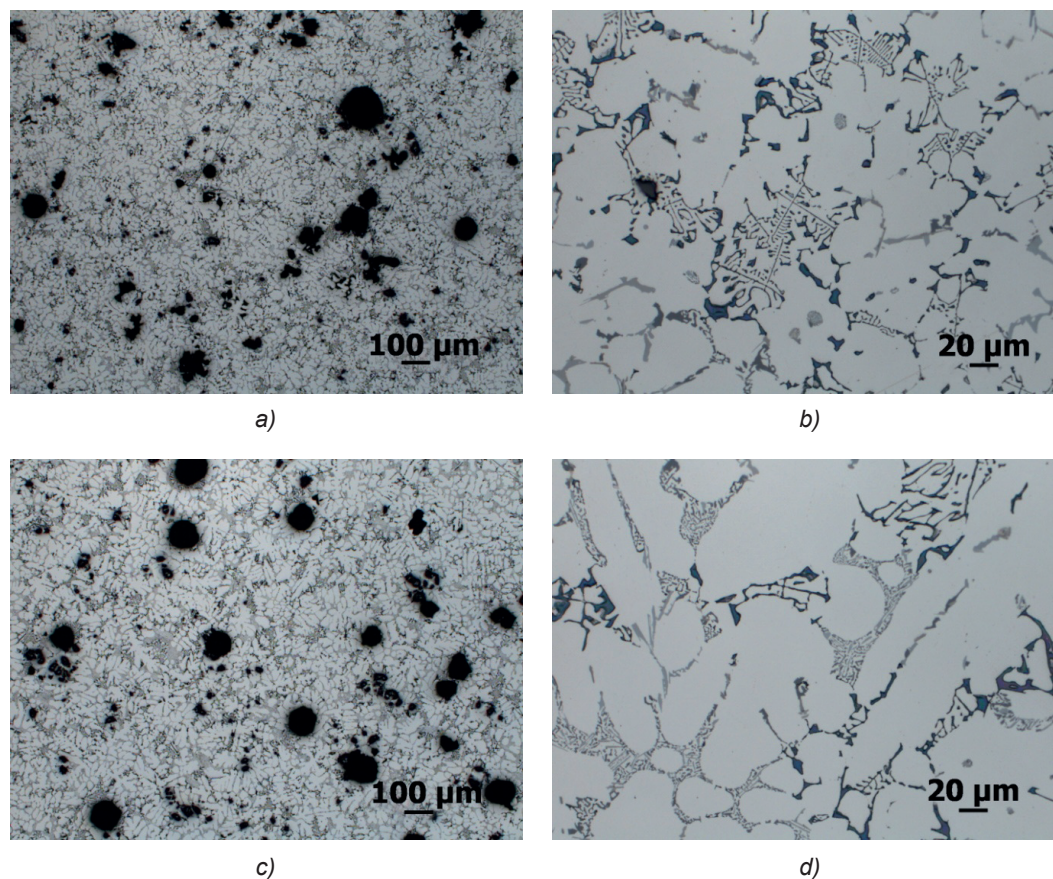
Due to the limited resolution of X-ray CT, the CT imaging was complemented by observation of the microstructure under a Zeiss Axio Observer.Z1m optical microscope.

Microscope observations and micrographs were carried out on cross-sections. The specimens were polished with abrasive paper with gradation of 220 microns, then polished on diamond pastes of successive gradations of 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0.25  $\mu\text{m}$ . In order to reveal the microstructure of the samples they were etched with Mi1Al (0.5 HF, 99.5 H<sub>2</sub>O) to insert standard in PN-H-04512:1975 [15].

The alloy structures from both casting methods feature eutectic  $\alpha$  with the precipitates of Si and the Mg<sub>2</sub>Si phase. A large number of gas pores were revealed in CLA and gravity cast samples. It can also be observed that the gravity cast sample features more spherical pores, as found by X-ray CT imaging. The gas pore diameter in both materials reaches 200  $\mu\text{m}$ . The CLA cast alloy features a greater refinement of dendrites than

porowatości gazowych dla obydwu materiałów wynosi do 200  $\mu\text{m}$ . Stop otrzymany z użyciem metody CLA posiada znacznie większe rozdrobnienie dendrytów w stosunku do stopu otrzymanego odlewano grawitacyjnie. Otrzymane obrazy mikrostruktury przedstawiono na rysunku 7.

in the gravity cast alloy. The produced microstructural images are shown in Figure 7.



Rys. 7. Mikrostruktura odlewów: a,b) metoda CLA, c,d) metoda grawitacyjna

Fig. 7. Microstructure by casting process type: a,b) CLA, c,d) gravity casting

### 3.3. Badanie właściwości mechanicznych

W celu porównania wybranych parametrów wytrzymałościowych odlanych próbek otrzymanych różnymi metodami odlewania stopów przeprowadzono statyczną próbę rozciągania w temperaturze otoczenia, zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 [16]. Badanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu EU20 producenta VEB Werkstoffprüfmasschinen Leipzig na czterech próbkach odlanych różnymi metodami przy przyroście obciążenia równym 1,25 kN/s. Uśrednione wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Uzyskane wartości dla obu metod wytwarzania nie różnią się w sposób istotny pod względem wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ) i granicy plastyczności ( $R_e$ ), przy czym stop odlewany grawitacyjnie wykazuje wyższą twardość Brinella (HB), natomiast stop odlewany metodą CLA – korzystniejsze właściwości plastyczne (A, Z).

### 3.3. Testing of mechanical properties

In order to compare selected strength parameters in the samples cast with the two processes, a static tensile test at room temperature was carried out according to PN-EN ISO 6892-1:2010 [16]. A tensile test was carried out on a type testing machine manufacturer VEB Werkstoffprüfmasschinen EU20 Leipzig on four samples cast in various ways with the increase of load equal 1.25 kN/s. Averaged results are shown in Table 3.

The test results for both casting processes do not vary significantly in tensile strength ( $R_m$ ) and yield point ( $R_e$ ), the gravity cast alloy has a higher Brinell value (HB), while the CLA cast alloy has better plastic properties (A, Z).



Tabela 3. Uzyskane wyniki badań wybranych właściwości mechanicznych  
Table 3. Test results for selected mechanical properties

Metoda odlewania / Casting process	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>e</sub> , MPa	A, %	Z, %	HB
CLA/CLA	160	153	0,4	0,75	58
grawitacyjna/gravity	158	154	0,1	0,25	77
rozrzut wartości / scatter of the measured values	±7	±4,5	±0,1	±0,25	±8

#### 4. Podsumowanie

Metoda tomografii komputerowej pozwala na szybką i bezinwazyjną analizę wad związanych z porowatością struktury wewnętrznej odlewu. Prześwietlanie próbek z mniejszą rozdzielczością umożliwiło wstępną ocenę jakości badanych elementów w całej ich objętości (rys. 2). Możliwy jest wybór fragmentu odlewu wymagającego dokładniejszej analizy. Zastosowanie większej rozdzielczości podczas prześwietlania pozwoliło stwierdzić, że badane fragmenty odlewów wykonanych z użyciem metody grawitacyjnej i CLA wykazywały porowatość gazową na podobnym poziomie: dla metody grawitacyjnej – 1,73%, dla metody CLA – 1,64%. Porównanie wielkości i kształtu porów w odlewach wskazuje, że w metodzie grawitacyjnej uzyskano wydzielenia większe i bardziej globularne. Różnice w kształcie porów zaobserwowane między omawianymi metodami odlewania zostały potwierdzone badaniami mikrostruktury, co zostało przedstawione na rysunku 7.

W tabeli 3 zestawiono wyniki wybranych właściwości mechanicznych badanego stopu odlewane z zastosowaniem metody CLA i grawitacyjnej. Uzyskane wartości: wytrzymałość na rozciąganie (R<sub>m</sub>) i granica plastyczności (R<sub>e</sub>) wykazują stosunkowo niewielką różnicę. Wydłużenie (A), przewężenie (Z) i twardość Brinella (HB) różnią się znacząco. Na właściwości te wpłynęły różne warunki krzepnięcia (mimo zachowania takich samych średnic odlewu), czego wynikiem jest różnica wielkości dendrytów (rys. 7).

Przeprowadzone badania porównawcze dwóch różnych procesów odlewniczych wskazują, że wstępne próby niskociśnieniowego odlewania przeciwgrawitacyjnego (CLA) nie dały w pełni spodziewanych efektów.

Ocena struktury wewnętrznej odlewów za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej pozwalała w stopach aluminium na lokalizację i pomiar defektów odlewniczych w postaci porowatości gazowej oraz utworzenie obrazów przekrojowych 2D i przestrzennych (3D). Na uwagę zasługuje także fakt, że mimo braku dużych różnic podczas badania CT, wartości: twardość Brinella oraz wydłużenie odlewów – znacznie różnią się w poszczególnych metodach odlewniczych. W przypadku zastosowania w procesie odlewniczym

#### 4. Summary

The X-ray CT imaging allows a quick and non-invasive analysis of defects caused by internal structure porosity in castings. The X-ray imaging of samples at low resolution enabled a preliminary quality assessment of the test samples across their entire volume (Fig. 2). It is possible to select a specific fragment of a casting which requires a more detailed analysis. Higher resolution of X-ray imaging revealed that the tested CLA and gravity cast sample fragments have similar shares of gas porosity, i.e. 1.73% from gravity casting and 1.64% from CLA casting. The comparison of porosity size and shape in the castings shows that gravity castings have larger and more globular precipitates. The differences in the pore form found between the discussed casting processes were confirmed by microstructural examination, as shown in Figure 7.

Table 3 shows the results of selected mechanical property tests of the CLA and gravity castings. The produced values, i.e. tensile strength (R<sub>m</sub>) and yield stress (R<sub>e</sub>) demonstrate relatively low differences. Elongation (A), reduction (Z) and Brinell hardness (HB) show large differences between the two processes. These properties were affected by different solidification conditions (in spite of the identical casting diameters), resulting in differences in dendrite sizes (Fig. 7).

The comparative examinations made on two casting processes demonstrate that the preliminary tests of CLA casting did not provide the expected results in full.

The internal casting structure evaluation by X-ray CT allowed to locate and measure the casting defects, namely gas porosity, in the aluminium alloys, and to generate 2D and 3D cross-section images. A noteworthy fact is that despite the lack of large differences in the CT scans, the values of Brinell hardness and elongation of the castings are very different between the specific casting methods. The CLA process with process heads from an aluminium alloy did not significantly affect the produced casting quality. Hence it would seem necessary to apply treatment, such as refining, modification and longer times of holding the liquid metal at lower pressure to improve the quality of castings.

nadlewów technologicznych ze stopu aluminium metoda CLA nie wpłynęła w znaczący sposób na jakość otrzymanych odlewów. W związku z powyższym wydaje się konieczne zastosowanie zabiegów, takich jak: rafinacja, modyfikacja i dłuższy czas utrzymania ciekłego metalu w warunkach obniżonego ciśnienia w celu podniesienia jakości odlewów.

Uzyskane wyniki eksperymentalne potwierdziły możliwość stosowania metody CLA w warunkach Instytutu Odlewnictwa. Z uwagi na fakt, że były to pierwsze próby stosowania tej metody, wybrano stop aluminium – głównie ze względu na bezpieczeństwo prowadzonego eksperymentu.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań porównujących dwie różne metody odlewnicze wysunięto następujące wnioski:

1. Za pomocą rentgenowskiego tomografu komputerowego bezinwazyjnie wykryto wady odlewnicze materiału, w postaci porowatości gazowej. Oceniono ich wielkość i rozmieszczenie. Wyróżnienie tych wad z otoczenia we wnętrzu próbek zależy między innymi od rozdzielczości przestrzennej oraz kontrastu analizowanego obrazu.
2. Absorpcja promieniowania rentgenowskiego badanego obiektu zależy od gęstości i budowy atomowej materiału oraz grubości ścian elementu badanego. Poszczególne elementy struktury badanych odlewów (fazy), z uwagi na podobną absorpcję promieniowania, są słabo wykrywalne podczas prześwietlania tomografem komputerowym.
3. Pierwsze próby zastosowania metody CLA nie wpłynęły znacząco na jakość otrzymanego stopu. Głównym powodem mogło być zastosowanie złomu obiegowego w postaci nadlewów poprodukcyjnych (materiał złej jakości) i rezygnacja z dodatkowych zabiegów metalurgicznych.
4. W kolejnych próbach stosowania metody CLA przewiduje się użycie czystych materiałów wsadowych na bazie aluminium. Mając doświadczenie dotyczące zachowania bezpieczeństwa, kontroli temperatury spalin i innych parametrów wymaganych w procesie odlewania przy użyciu metody CLA, możliwe będzie rozpoczęcie prób ze stopami wyżej topliwymi (na bazie niklu, żelaza). Dla porównania jakości otrzymanych odlewów planowane jest zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej oraz badań metalograficznych i wytrzymałościowych.

The produced experimental results confirm the feasibility of CLA casting in the environment of the Foundry Research Institute. Aluminium was chosen due to the safety of the experiment, since it included the first attempts at CLA casting application.

## 5. Conclusion

Based on the completed comparative tests on two casting processes, the following conclusions can be drawn:

1. An X-ray CT scanner revealed casting defects in the NDT process of gas porosity in the material. The size and distribution of defects were evaluated. The discrimination of such defects from their environment inside of the samples depends, among other things, on the spatial resolution and contrast of analysed images.
2. X-ray adsorption of the test samples depends on the density and atomic structure of the material, as well as the section thickness of the test sample. The individual elements of the tested casting structures (i.e. phases) are difficult to detect by X-ray CT due to the similarities in radiation adsorption.
3. The first attempts at applying the CLA process did not have a significant impact on cast alloy quality. The main cause here can be that returns, i.e. processing heads (hence a bad quality material) were used, and no additional metallurgical treatment was applied.
4. Further application tests of the CLA process will employ pure aluminium based charge materials. With the experience in safety precautions and the control of exhaust gas temperature and other parameters required in CLA casting it will be possible to begin tests with high refractory alloys (i.e. based on Ni and Fe). The quality of castings will be compared by X-ray CT, metallographic examination methods and strength tests.

## Podziękowania

Autorzy dziękują kierownikom swoich zakładów: dr hab. inż. Marzannie Książek, prof. IOd oraz dr hab. inż. Zenonowi Pirowskiemu, prof. IOd za konsultację merytoryczną.

Publikacja zrealizowana w oparciu o prace statutowe Instytutu Odlewnictwa, między innymi „Poprawa odporności na zużycie erozyjne i zmęczenie cieplne wybranych stopów na bazie układu Fe-Al-Cr” (zlec. 4010/01), finansowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Acknowledgements

The authors would like to thank the managers of their facilities: Assoc. Prof. Marzanna Książek, PhD Eng. and Assoc. Prof. Zenon Pirowski, PhD Eng. for their scientific consultancy during this study.

This publication was based on the statutory works of the Foundry Research Institute, among others, on the study entitled: “Improving the erosive wear and thermal fatigue resistance of selected alloys based on the Fe-Al-Cr system” (No. 4010/01), financed by the Ministry of Science and Higher Education.

## Literatura/References

1. Pirowski, Z. (2013). *Stopy niklu jako nowoczesne tworzywo odlewnicze do pracy w ekstremalnych warunkach eksploatacji*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
2. Campbell, J. (2012). Stop Pouring, Start Casting. *Int. J. Metalcasting*, (Summer 2012), 7–18.
3. Chandley, G.D. (1999). Use of vacuum for counter-gravity casting of metals. *Mat. Res. Innovat.*, 3(3), 14–23.
4. *Quality and process control benefits flow from lower-cost method. Hitchiner's CLA Process*. Materiały firmy HITCHINER Manufacturing Co., Inc., Milford, USA. <http://www.hitchiner.com> [dostęp: 10.10.2014].
5. *Countergravity Casting*. Materiały firmy HITCHINER Manufacturing Co., Inc., Milford USA. <http://www.hitchiner.com> [dostęp: 10.10.2014].
6. Cho, I.S. et al. (2012). Evaluation of defects in aluminum piston castings by using ultrasonics and computer tomography. *China Foundry*, 9(3), 275–278.
7. Tchórz, A., Boroń, Ł. (2013). Ilościowa charakterystyka 3D morfologii grafitu w żeliwie sferoidalnym przy użyciu rentgenowskiej tomografii komputerowej [w:] *XLI Szkoła Inżynierii Materiałowej Kraków–Krynica 24–27 IX 2013*, red. J. Pacyna, Kraków: Wydawnictwo Naukowe Akapit, 392–395.
8. Długosz, P. et al. (2010). Kompozyty ALFA wytworzone metodą mechanicznej syntezy – analiza rozkładu fazy zbrojącej za pomocą mikrotomografii komputerowej. *Prace Instytutu Odlewnictwa*, 50(3), 39–50.
9. Hochrein, S. (2012). Holistic analysis of aluminum die cast parts. *CASTING Plant & Technol.*, (4), 32–34.
10. Uniwersał, A. et al. (2013). Porównanie wybranych metod badania porowatości odlewów ciśnieniowych ze stopu magnezu AZ91. *HUTNIK – Wiadomości Hutnicze*, 80(4), 235–241.
11. Ratajczyk, E. (2012). Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, 16(5), 104–113.
12. Tchórz, A., Książek, M. (2014). *Zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej w inżynierii materiałowej*. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich Oddział w Gorzowie Wlkp. VIII Międzynarodowa Konferencja.
13. *Hydro Primary Foundry Alloys*. Technical Data Sheet AISi9Mg.
14. [www.odlew.com.pl](http://www.odlew.com.pl) [dostęp: 01.08.2013].
15. PN-H-04512:1975 Metale nieżelazne – Odczynniki do ujawniania mikrostruktury.
16. PN-EN ISO 6892-1:2010 Statyczna próba rozciągania w temperaturze otoczenia. Metoda B. Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej.



