Journal of Applied Materials Engineering
2019, Vol. 59, Issue 3 (formerly PRACE INSTYTUTU ODLEWNICTWA)

Ocena budowy wielowarstwowych form ceramicznych pod kątem nieciągłości wewnętrznych przy zastosowaniu metody rentgenowskiej tomografii komputerowej

Evaluation of the structure of multi-layer ceramic moulds for internal discontinuities using the x-ray computed tomography method

Adam Tchórz , Izabela Krzak , Marzanna Książek

[1]*ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska*
[1]*ŁUKASIEWICZ Research Network – Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland*

**Corresponding author: adam.tchorz@iod.krakow.pl*

Received: 05.11.2019. Accepted in revised form: 15.01.2020. DOI: 10.7356/iod.2019.11

Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) do oceny jakości technologicznej wielowarstwowych form ceramicznych stosowanych w procesie precyzyjnego odlewania. Zaprezentowano koncepcje prowadzenia badań pod kątem ujawnienia i wizualizacji określonych nieciągłości wewnętrznych w strukturze odlewniczych form ceramicznych, a następnie określenia ich charakteru. Rejestracja tomograficzna oparta na analizie obrazów 2D i 3D umożliwiła identyfikację nieciągłości wewnętrznych w formach ceramicznych, pod kątem rozwarstwień czy porowatości wraz z wyznaczeniem jej procentowej ilości, objętości, kształtu porów. Badania wykonano dla dwóch różnych form ceramicznych (molochitowej i kwarcowej), wykonanych metodą wytapianych modeli.

Słowa kluczowe: rentgenowska tomografia komputerowa, formy ceramiczne, odlewnictwo precyzyjne

Abstract

This study presents the possibility of using x-ray computed tomography (CT) for the technological quality assessment of multi-layer ceramic moulds used in the precision casting process. Testing concepts were presented with regard to the detection and visualisation of specific internal discontinuities in the structure of ceramic moulds and the determination of their nature. Tomographic recording based on 2D and 3D images enabled the identification of internal discontinuities in ceramic moulds with regards to delamination or porosity with the determination of the percentage of their count, volume and pore shape. The tests were performed for two different ceramic moulds (molochite and quartz) made with the melted models method.

Keywords: x-ray computed tomography, ceramic moulds, precision foundry

1. Wprowadzenie

Proces odlewania precyzyjnego metodą wytapianych modeli jest szeroko stosowany w przemyśle maszynowym i lotniczym. Zastosowanie tej technologii pozwala na uzyskanie wyrobów odpowiedzialnych, jak i o skomplikowanej geometrii. Zazwyczaj są to odlewy o złożonych kształtach, dużej dokładności wymiarowej i małej chropowatości powierzchni, niewymagające dalszej obróbki, np. skrawaniem. Ceramiczne formy odlewnicze są nieodłączną częścią technologii odlewania precyzyjnego, mają zasadniczy wpływ na jakość wyrobu i mu-

1. Introduction

The melted models precision founding process is widely used in the machine and aviation industry. The application of this technology enables sustainable, and geometrically complex products to be obtained. Usually, these are castings of complex shapes with high dimensional precision and low surface roughness that do not require further processing, e.g. machining. Ceramic moulds are an integral part of the precision casting process, with an essential impact on product quality. They must meet a series of physical and mechanical

szą spełniać szereg wymagań fizyko-mechanicznych. Formy ceramiczne wykonywane są z mas formierskich, których podstawowymi składnikami są proszki ceramiczne, spoiwa i materiały pomocnicze. Od ich właściwości zależą parametry form, jak i odlewów. Dlatego pierwsza warstwa „przymodelowa" powinna charakteryzować się m.in. dobrą żaroodpornością i brakiem reaktywności z metalem. Natomiast kolejne warstwy konstrukcyjne powinny być odpowiednio wytrzymałe, gazoprzepuszczalne oraz posiadać wysoką przewodność cieplną. Ponadto formy odlewnicze powinny posiadać dobrą wybijalność [1,2,3,4].

Formy ceramiczne wykonuje się wieloetapowo przez nakładanie kolejnych warstw ceramiki (warstwa przymodelowa i 2−8 warstw konstrukcyjnych) na woskowy model, suszenie, wytapianie wosku oraz wypalanie formy. Na jakość form duży wpływ mają wewnętrzne defekty w postaci nierównomiernej, zróżnicowanej pod względem wielkości porowatości, pęknięć, rozwarstwień poszczególnych warstw, czy zróżnicowanej ich grubości. Odlewy precyzyjne wytwarzane metodą wytapianych modeli w dużym stopniu zależą od jakości formy ceramicznej.

W artykule przedstawiono identyfikację nieciągłości wewnętrznych typu: pęknięcia, rozwarstwienia, porowatość oraz opisujące ją parametry (ilość, objętość, kształt, rozkład średnicy porów).

2. Materiał i metodyka badań

Materiałem do badań były formy ceramiczne wykonane w technologii wytapianych modeli. Składały się one z warstwy przymodelowej i 7 warstw konstrukcyjnych, przy czym różniły się one materiałem do ich wykonania. Użyte materiały są ogólnie stosowane w przemyśle i wykorzystywane komercyjnie, potwierdzone atestami. Do wytworzenia form typu „A" zastosowano: na pierwszą warstwę wodne spoiwo Ludox SK-F i jako osnowę – mączkę molochitową (Al_2O_3, SiO_2) o granulacji 74 µm (firmy Capital Refractories Ltd. UK); na kolejnych siedem warstw konstrukcyjnych użyto: spoiwo – uwodniony krzemian etylu i jako osnowę – piasek molochitowy drobnoziarnisty 0,1−0,3 mm (firmy Capital Refractories Ltd. UK). Do wytworzenia form typu „B" zastosowano: na pierwszą warstwę wodne spoiwo Ludox SK-F i jako osnowę – mączkę kwarcową (SiO_2) o granulacji 75 µm (firmy SKSM sp. z o.o. Sobótka); na kolejnych siedem warstw konstrukcyjnych użyto: spoiwo – uwodniony krzemian etylu i jako osnowę – piasek kwarcowy drobnoziarnisty 0,1−0,3 mm (firmy TKSM „Biała Góra" sp. z o.o.) . Do celów badawczych wykonano sześć sztuk form ceramicznych typu „A" i sześć sztuk form ceramicznych typu „B". Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe obrazy mikrostruktury form ceramicznych typu „A" i „B".

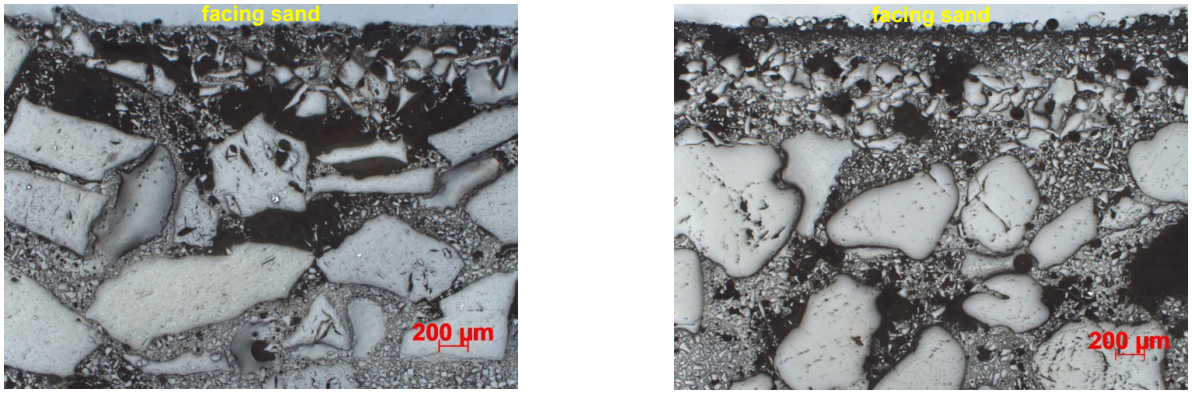
requirements. Ceramic moulds are made of moulding compounds, of which the essential components are ceramic powders, binders and support materials. Their properties determine the parameters of both the moulds and castings. Hence, the first layer (facing sand) should feature i.a. good heat resistance and no reactions with metal. However, the subsequent structural layers should be suitably durable, gas-permeable and highly thermally conductive. Furthermore, the moulds should have good knock-out properties [1,2,3,4].

Ceramic moulds are made in multiple stages, by the application of the subsequent ceramic layers (facing sand and 2−8 structural layers) onto a wax model, drying, wax melting and mould bake-out. The quality of the moulds is greatly influenced by any internal defects, such as an uneven, variable magnitude of porosity, cracks, layer delamination or variable layer thickness. Precision castings made with the melted models method are highly dependent on the quality of the ceramic mould.

This study presents the identification of internal discontinuities, such as: cracks, delamination, porosity and their descriptive parameters (count, volume, shape, pore diameter distribution).

2. Test material and methodology

The test material were ceramic moulds made in the melted models technology. They consisted of the facing sand and 7 structural layers, however they differed in production materials. The materials used were common in industrial and commercial use, approved with certificates. To manufacture "A"-type moulds, the following were used: first layer – Ludox SK-F water-based binder, and matrix – molochite dust (Al_2O_3, SiO_2) with a 74 µm grain size (by Capital Refractories Ltd. UK); on the subsequent seven structural layers: binder – hydrated ethyl silicate, and matrix – fine molochite sand, 0.1−0.3 mm (by Capital Refractories Ltd. UK). To manufacture "B"-type moulds, the following were used: first layer – Ludox SK-F water-based binder, matrix – quartz dust (SiO_2) with a 75 µm grain size (by SKSM sp. z o.o. Sobótka); on the subsequent seven structural layers: binder – hydrated ethyl silicate, and matrix – fine quartz sand, 0.1−0.3 mm (by TKSM "Biała Góra" sp. z o.o.) For research purposes, six "A"-type ceramic moulds and six "B"-type ceramic moulds were manufactured. Figure 1 shows example images of the microstructure of the "A"- and "B"-type ceramic moulds.



a) b)

Rys. 1. Przykładowe obrazy mikrostruktury form ceramicznych: a) typu: A – molochitowa i b) typu B – kwarcowa, przy powiększeniu 50x

Fig. 1. Example images of the microstructure of ceramic moulds: a) type: A – molochite; and b) type: B – quartz; 50x zoom

W celu ujawnienia wewnętrznych nieciągłości w formach ceramicznych i poznania ich charakterystyki, poddano je badaniu metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT). Metoda ta jest nieniszczącą techniką, która umożliwia uzyskanie obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D). Pozwala to nie tylko na jakościową ocenę badanego materiału, lecz również umożliwia przeprowadzenie zaawansowanych analiz [5,6,7]. Badania zostały wykonane za pomocą stanowiska CT typu v|tome|x l-450 będącego na wyposażeniu Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Odlewnictwa. Podczas badań zastosowano następujące parametry: napięcie 250 kV, natężenie 300 µA, czas integracji detektora 500 ms, liczba projekcji 2200, wielkość woksela wynosiła 124 µm. Próbki poddane badaniom CT miały wymiary 200×100×50 mm. Wszystkie operacje związane z obróbką danych z CT były wykonywane za pomocą oprogramowania VGStudio Max 2.0 oraz FijiIs Just ImageJ. Oprogramowania te wykorzystują dane skanowania do stworzenia trójwymiarowego modelu wielkości, które mogą być wyświetlane w widokach 2D lub 3D. Moduły tych programów, służących do analizy defektów oferują kilka różnych algorytmów pozwalających wykryć wewnętrzne nieciągłości np. porowatości czy wtrącenia, które są zlokalizowane w obrębie obiektu. Dodatkowo dostarczają szczegółowych informacji na temat poszczególnych nieciągłości, czyli ich rodzaju, rozmiarów, objętości, kształtu, powierzchni, liczby i położenia. Jest to istotne ze względu na to, aby dokładnie poznać i ocenić budowę wewnętrzną obiektu. Porowatość definiowana jest jako stosunek objętości porów do całkowitej objętości obiektu. Przeprowadzona analiza będzie uwzględniać porowatość zamkniętą i otwartą. Analizując obiekt pod względem ilości porowatości, dodatkowo należy uwzględnić pewne zależności np. stosunek porowatości zamkniętej do otwartej, ilość porowatości od objętości poszczególnych porów czy kształt

To detect any internal discontinuities in the ceramic moulds and identify their characteristics, they were subject to x-ray computed tomography (CT). This is a non-destructive method that enables sectional (2D) and spatial (3D) images to be obtained. This enables not only performing quality evaluation of the test material, but also conducting advanced analyses [5,6,7]. The tests were performed using a v|tome|x l-450 CT station, in the equipment of the Łukasiewicz Research Network – Foundry Research Institute. During the tests, the following parameters were applied: 250 kV voltage, 300 µA current, 500 ms timing, 2200 projections and the voxel size was 124 µm. The dimensions of the specimens subjected to CT tests were 200×100×50 mm. All operations related to CT data were performed using VGStudio Max 2.0 and FijiIs Just ImageJ software. This software uses scan data to create a 3D model of magnitudes to display in 2D or 3D views. The modules of this software, used for defect analysis, offer several algorithms enabling the detection of internal discontinuities, e.g. porosity or inclusions, within the object. In addition, they provide detailed information on individual discontinuities, i.e. type, dimensions, volume, shape, surface, count and location. This is important for the specific identification and evaluation of the internal structure of the object. Porosity is defined as the ratio of the pore volume to the total volume of the object. The analysis conducted includes closed and open porosity. By analysing the object for the porosity count, one should also account for some relationships, e.g. the ratio of closed porosity to open porosity, the porosity count and the volume of individual pores or pore shape and its location. In addition, it may result from cracks or delamination in the given form. Hence, it is also important to account for its shape and the diameter of the individual pores. This indicates the discrepancies between the given specimens and the causes of their formation.

porów od jej lokalizacji. Dodatkowo może ona wynikać z pęknięć czy rozwarstwień w danej formie. Dlatego też istotne jest, aby został uwzględniony kształt, jak i średnica poszczególnych porów. Wskaże to rozbieżności pomiędzy danymi próbkami i przyczyny ich powstania.

Przydatną wielkością określającą wymiar porów jest maksymalna długość porów, liczona wzdłuż pomiarowego odcinka prostej płaskiego przekroju. Inną liniową miarą wielkości porów jest średnia długość cięciwy, określona jako średnia arytmetyczna z pomiarów najdłuższych cięciw pojedynczych porów. Bardzo istotne w opisie struktury ośrodków porowatych jest uwzględnienie ich anizotropii i niejednorodności. Wszelkie zaburzenia tej struktury mogą pociągnąć za sobą lokalną zmianę właściwości mechanicznych [8,9,10]. Może się jednak zdarzyć, że anizotropia i niejednorodność struktury są pożądane albo są naturalną cechą materiałów (np. formy ceramiczne). Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe ceramiczne formy poddane badaniom nieniszczącym metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej.

A useful magnitude determining the pore size is the maximum pore length, counted along the measurement segment of a flat section line. Another linear measurement of pore magnitude is the average chord length, determined as an arithmetic average of measurements of the longest chords of individual pores. To describe the structure of porous media, it is very important to account for their anisotropy and heterogeneity. Any disruptions of this structure may result in a local variation of mechanical properties [8,9,10]. However, structure anisotropy and heterogeneity may be desirable or natural to materials (e.g. ceramic moulds). Figure 2 shows example ceramic moulds subject to non-destructive testing using the x-ray computed tomography method.

a) b)

Rys. 2. Przykładowe próbki poddane badaniom CT: a) próbka typu A; b) próbka typu B (wymiary próbek: 200×100×50 mm)

Fig. 2. Example specimens subject to CT testing: a) A-type specimen; b) B-type specimen (specimen dimensions: 200×100×50 mm)

3. Wyniki badań i ich dyskusja

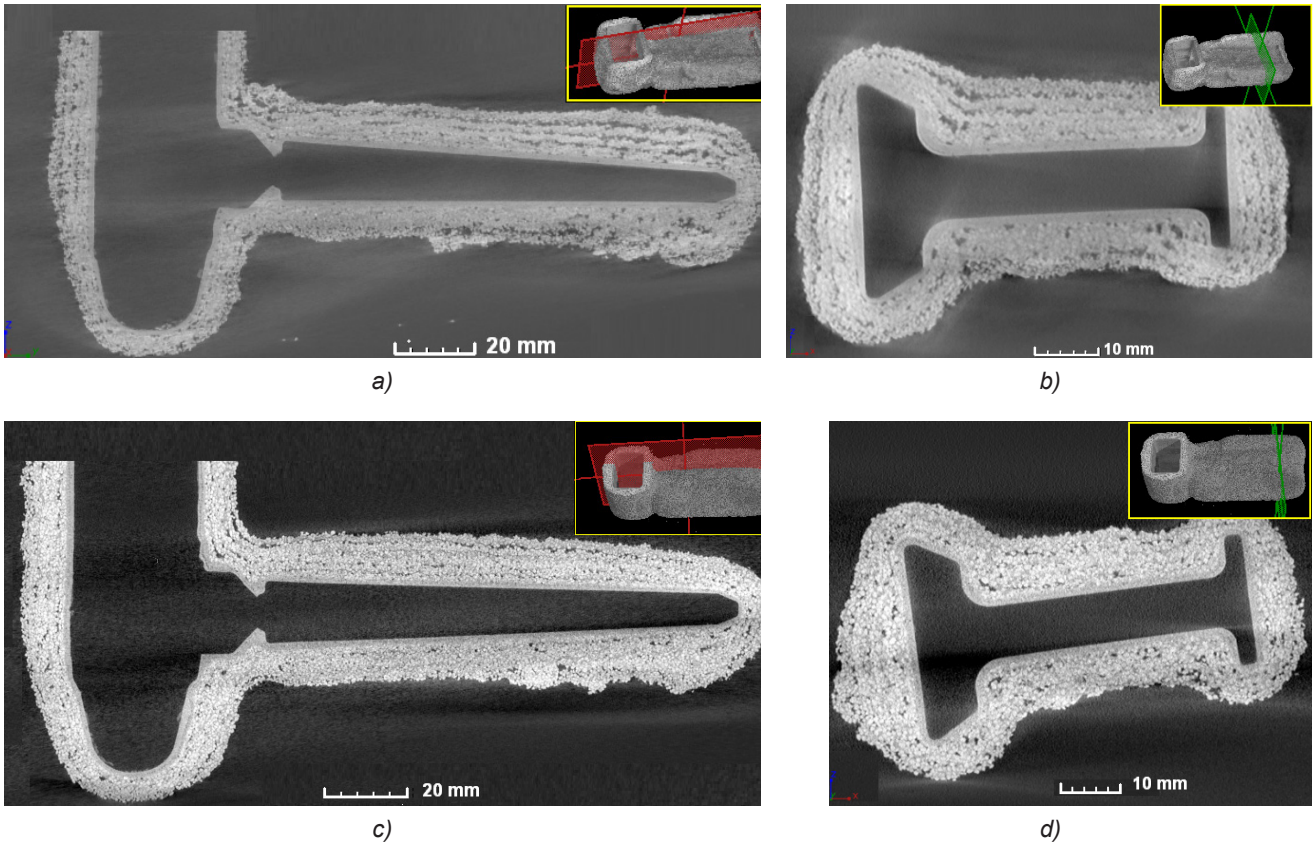
Wyniki w postaci tomogramów, uzyskane metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej charakteryzowały się wystarczającą jasnością i kontrastem, co pozwoliło na ujawnienie wewnętrznych nieciągłości i określenie ich charakteru: ich ilości, wymiarów, kształtu, lokalizacji w przestrzeni obiektu. Na rysunku 3 przedstawiono (dla form typu A i B) przykładowe przekroje formy oraz ich lokalizację w obiekcie 3D.

Analizując poszczególne próbki, niezależnie od typu zastosowanego materiału w formach ceramicznych zaobserwowano występowanie porowatości kierunkowej i niekierunkowej. Porowatość kierunkowa jest zlokalizowana wzdłuż poszczególnych warstw formy (tworząc rozwarstwienia), natomiast niekierunkowa jest rozmieszczona w objętości formy i tworzą ją zazwyczaj pory mniejszych rozmiarów. Analiza przekrojów w próbkach typu A (na bazie molochitu) wykazała, że w strukturze wewnętrznej zlokalizowane są pory o większych rozmiarach oraz rozwarstwienia poszczególnych

3. Test results and discussion thereof

The results, in tomogram form, obtained using the x-ray computed tomography method, featured sufficient brightness and contract, which enabled internal discontinuities to be detected, and their nature determined: count, dimensions, shape, location in the object space. Figure 3 shows (for A- and B-type moulds) example sections of a mould and their locations in the 3D object.

In the analysis of the individual specimens, regardless of the type of material used in the ceramic moulds, directional and non-directional porosity was found. Directional porosity was located along individual mould layers (forming delamination), while non-directional porosity was distributed in the mould volume, usually formed by smaller pores. The sectional analysis of the A-type specimens (molochite-based) showed that the internal structure included larger pores and delamination of the individual structural layers compared to the B-type moulds. The B-type moulds (quartz-based) had



Rys. 3. Przykładowe przekroje i ich przestrzenna lokalizacja w obiekcie dla form typu A (a, b) i B (c, d)
Fig. 3. Example sections and their spatial location in the object for A- (a, b) and B-type (c, d) moulds

warstw konstrukcyjnych niż w formach typu B. Formy typu B, na bazie kwarcu, posiadały zwartą strukturę z równomiernie rozłożoną porowatością. Dla obu rodzajów próbek zaobserwowano w pojedynczych formach pęknięcia w układzie wlewowym.

Na podstawie przeprowadzonych analiz ilościowych określono łączny udział porowatości w formach ceramicznych, gdzie średnia wartość porowatości całkowitej, z sześciu pomiarów wynosiła dla próbek typu: A 6,8%, B 4,2%. Większa porowatość w próbkach typu A, na osnowie molochitu, może być spowodowana większą ilością rozwarstwień warstw konstrukcyjnych w porównaniu z próbkami typu B, na osnowie kwarcu. Rozwarstwienia te występowały w szczególności w warstwach zewnętrznych formy. Wpłynęło to również na poziom porowatości otwartej w próbce typu A (rys. 3). Dla próbek typu A o nr 3, 5 i 6 porowatość otwarta przekroczyła 50% w stosunku do porowatości całkowitej i wynosiła kolejno: 51%, 53%, 54%. Dla próbki nr 1 porowatość jest równa 50% porowatości całkowitej, a dla próbek o nr 2 i 4 wyniosła kolejno: 16%, 36% porowatości całkowitej. Wysoki poziom porowatości otwartej, przypadkowo zlokalizowanej może wpływać na wytrzymałość formy, sposób odprowadzenia ciepła z niej, a w konsekwencji na jakość finalnego odlewu. Próbki typu B, na osnowie kwarcu, charakteryzowały się bardziej zwartą a compact structure with evenly distributed porosity. For both types of specimens, gating cracks were found in individual moulds.

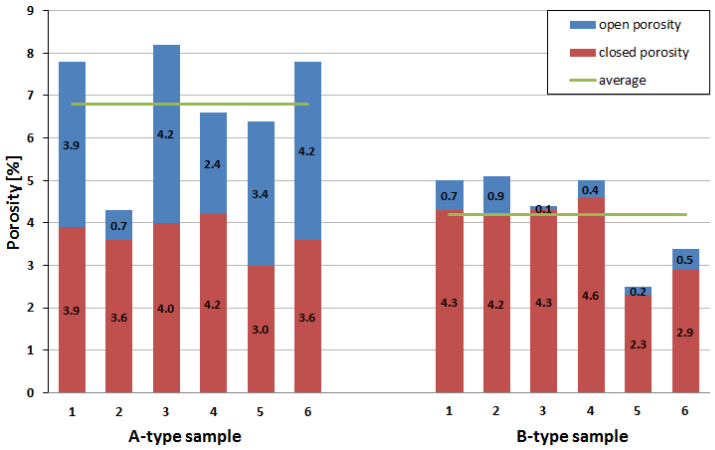
Based on quantitative analyses, the total share of porosity in the ceramic moulds was determined, where the average total porosity of six measurements was as follows for each specimen type: A = 6.8%, and B = 4.2%. The greater porosity in the A-type specimens, based on a molochite matrix, may have been caused by a greater count of delamination in the structural layers compared to the B-type specimens, based on a quartz matrix. This delamination occurred in particular in the outer layers of the mould. It also influenced the open porosity level in the A-type specimen (Fig. 3). For A-type specimens no. 3, 5 and 6, open the porosity exceeded 50% in relation to the total porosity, and reached: 51%, 53%, 54%, respectively. For specimen no. 1, open porosity was equal to 50% of the total porosity, while for specimens no. 2 and 4, it was: 16% and 36% of the total porosity, respectively. The high level of open porosity, included accidentally, may influence the mould strength, mould heat dissipation and thus the final casting quality. The B-type specimens, based on a quartz matrix, were characterised by a more compact structure, while the average open porosity of the six specimens was 11% of the total porosity. Figure 4 shows the percentage of

budową, a porowatość otwarta wynosiła średnio dla sześciu próbek 11% porowatości całkowitej. Na rysunku 4 przedstawiono procentowy udział porowatości całkowitej w tym otwartej i zamkniętej, w poszczególnych próbkach, typu A i B.

Na rysunku 5 przedstawiono dla form typu A i B przykładowe przestrzenne zobrazowanie porowatości oraz zależność liczności porowatości w funkcji ich rozmiarów.

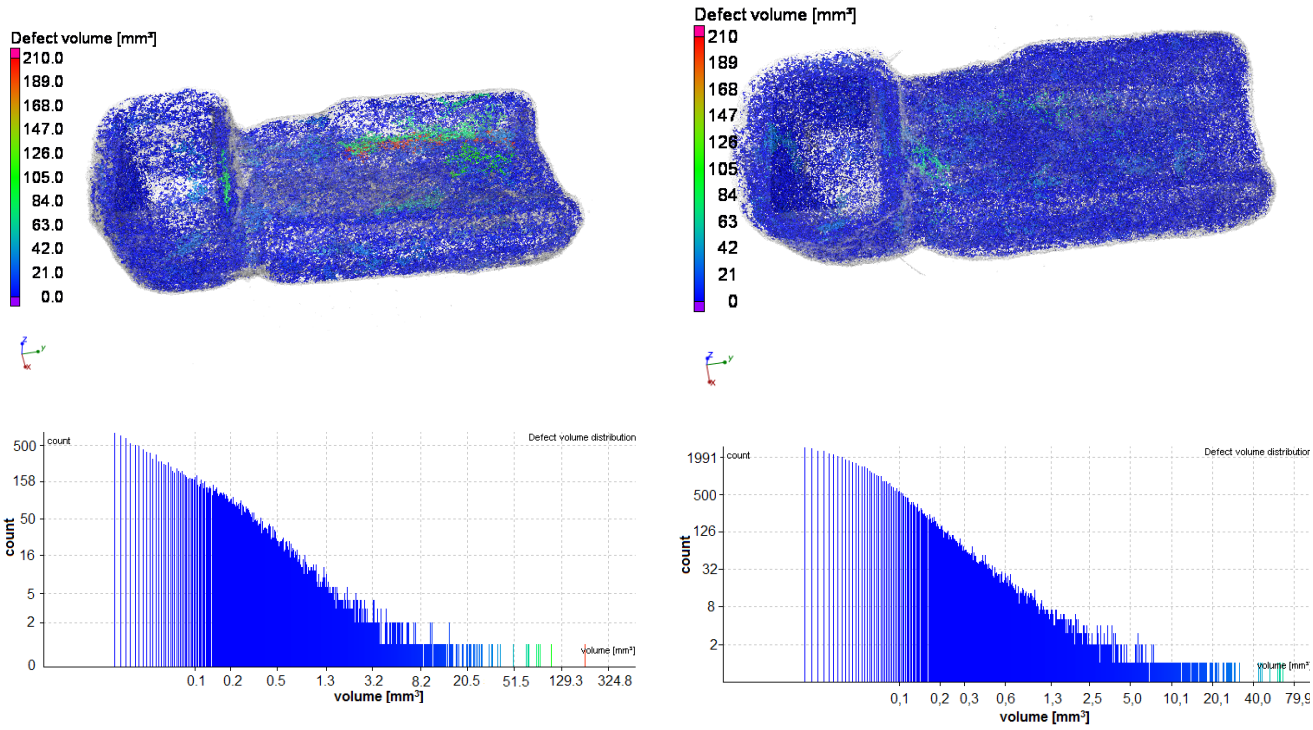
total porosity, including open and closed porosity, in the individual specimens, A- and B-type.

Figure 5 shows the example spatial imaging of porosity and porosity count in the function of the dimensions of A- and B-type moulds.



Rys. 4. Procentowy udział porowatości w poszczególnych próbkach typu A i B

Fig. 4. The percentage of porosity in individual A- and B-type specimens



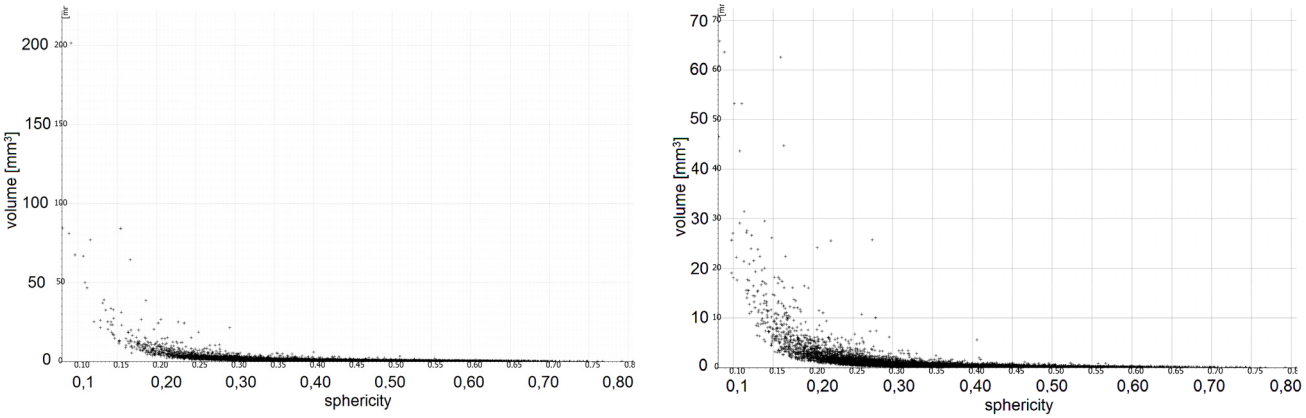
a) *b)*

Rys. 5. Przykładowa przestrzenna wizualizacja porowatości w formie typu A (a) i B (b)

Fig. 5. Example spatial visualisation of porosity in A- (a) and B- (b) type moulds

Przeprowadzona analiza porowatości ujawniła, że ceramiczne formy typu A i B charakteryzowały się równomiernym rozmieszczeniem porów (zbliżonych kształtem do kulistego) na przekroju warstw. Zaobserwowano najwięcej porowatości do objętości około 1 mm^3. Natomiast pory o największych rozmiarach zostały zlokalizowane w obrębie połączenia modelu z układem wlewowym lub w miejscach rozwarstwień poszczególnych warstw, ich maksymalna objętość przekracza nawet 200 mm^3. Na podstawie przestrzennej analizy zaobserwowano również, że w miejscach rozwarstwień tworzą się skupiska porowatości (aglomeracje, przypadkowo rozmieszczone między poszczególnymi warstwami) lub pory o wzdłużnym kształcie. Dodatkowo analizując rozkłady objętości poszczególnych pustych przestrzeni (porów) i ich ilości, można wyróżnić pewne zależności korelacyjne pomiędzy nimi, tj. najwięcej powtórzeń porowatości jest poniżej objętości 0,1 mm^3. Dla objętości porów, do wartości 4 mm^3, zachodzi korelacja liniowa ujemna, to znaczy, że wzrostowi ilości powtórzeń porów odpowiada spadek średnich wartości ich objętości. Natomiast w przypadku, kiedy objętość porów przekracza wartość 4 mm^3, ta zależność nie jest spełniona, występują przeważnie pojedyncze pory o znacznych objętościach (nawet powyżej 200 mm^3).

The porosity analysis showed that A- and B-type ceramic moulds featured an even distribution of pores (in nearly spherical shape) in the layer section. Most of the porosity was found to have a volume of up to approx. 1 mm^3. However, the largest pores were located within the model in connection with gating or at the delamination of individual layers, their maximum volume even exceeding 200 mm^3. Spatial analysis also revealed that porosity clusters (agglomerations, distributed randomly between the individual layers) or longitudinal pores formed at delamination points. In addition, by analysing the distribution of the volume of the individual empty spaces (pores) and their count, one may determine some correlations between them, i.e. most porosity repetitions were found below a volume of 0.1 mm^3. For pore volumes, up to 4 mm^3, there was a negative linear correlation, meaning that an increase in pore repetition counts was matched by a decrease in medium volume values. However, if the pore volume exceeded 4 mm^3, this relationship was not met, mostly single pores occurred at large distances (even above 200 mm^3).



Rys. 6. Wykres zależności kulistości od objętości porów w przykładowej formie typu A (a) i B (b)
Fig. 6. Plot of the relationship between pore sphericity and volume in the example A- (a) and B- (b) type moulds

Porowatość w sposób istotny może również wpływać na jakość form ceramicznych poprzez lokalizację dużych objętości porów oraz ich kształt. Na rysunku 6 zaprezentowano zależności kulistości porów zamkniętych od ich objętości. Analizę przedstawiono na przykładzie próbek typu: A o nr 1 i B o nr 1. Otrzymane wyniki wskazują jednoznacznie, że pory o znacznych objętościach odbiegają od kulistego kształtu, mają kształt wydłużony (nieregularny). Dodatkowo pory o dużym zróżnicowaniu kształtu charakteryzują się małą ilością powtórzeń. Natomiast im mniejsze są objętości porów, tym wzra-

Porosity can also have a significant impact on the quality of ceramic moulds through the location and shape of large pore volumes. Figure 6 shows the relationship between closed pore sphericity and volume. The analysis was based on specimens A-type no. 1, and B-type no. 1. The results obtained show clearly that large volume pores deviate from the spherical shape. They have a lengthened (irregular) shape In addition, pores with a wide variety of shape are characterised by a small repetition count. However, the smaller the pore volumes, the higher the count of pores with similar

sta ilość porów o podobnych cechach geometrycznych i kształcie zbliżonym do kulistego. W pozostałych analizowanych próbkach o nr 2−6 (typu A i B) korelacje objętości i kształtu porów wykazują podobną tendencję.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badań dla dwóch różnych form ceramicznych (molochitowej i kwarcowej), wykonanych metodą wytapianych modeli. Wytwarzanie wielowarstwowych form ceramicznych stosowanych w procesie precyzyjnego odlewania jest w przeważającej części procesem niezautomatyzowanym. Niejednokrotnie zdarzają się wewnętrzne defekty związane z przyczyn pracy człowieka. Metoda rentgenowskiej tomografii komputerowej umożliwia wykrycie zarówno takich wad, jak również wynikających z samego procesu technologicznego (np. pęknięcia, rozwarstwienia, porowatość itp.) oraz wyznaczenie ich parametrów, np. procentowego udziału porowatości, objętości czy kształtu porów. Badania o charakterze porównawczym miały na celu ocenę możliwości zastosowania rentgenowskiej tomografii komputerowej do oceny jakości technologicznej wielowarstwowych form ceramicznych. Rozkład porowatości, który odzwierciedla właściwości badanych form, jest opracowywany z uwzględnieniem wartości szacowanej porowatości.

Ze szczegółowych analiz wynika, że w przypadku próbek testowych typu A, na bazie molochitu, porowatość całkowita jest wyższa od próbek typu B, na bazie kwarcu, średnio o 2,6%. Próbki typu A charakteryzowały się znacznie większą porowatością otwartą, gdzie dla połowy badanych próbek wynosiła ona ponad 50% w stosunku do porowatości całkowitej. Dodatkowo posiadały one znacznie większą ilość rozwarstwień pomiędzy poszczególnymi warstwami. Próbki typu B, na osnowie kwarcu, posiadały bardziej zwartą budowę, a porowatość otwarta wynosiła średnio dla sześciu próbek 11% porowatości całkowitej.

Dla próbek typu A i B określono kształt porów. Otrzymane wyniki wskazują jednoznacznie, że pory o znacznych objętościach odbiegają od kulistego kształtu, mają kształt wydłużony (nieregularny). Natomiast im mniejsze są objętości porów, tym wzrasta ilości porów o podobnych cechach geometrycznych i kształcie zbliżonym do kulistego.

Pozostaje jeszcze kwestia określenia, jaki wpływ mają ujawnione w formach defekty na gotowe wyroby.

Podziękowania

Niniejsza praca była finansowana ze środków MNiSW w ramach projektu statutowego nr 8043/00 w 2018 r.

geometric features and nearly-spherical shapes. In other specimens analysed, no. 2−6 (A- and B-type), pore volume and shape correlations show a similar tendency.

4. Conclusions

The study presented the results of tests performed for two different ceramic mould types (molochite and quartz) made with the melted models method. The manufacture of multi-layered ceramic moulds used in the precision casting process is primarily a non-automated process. Internal defects caused by human works are not isolated incidents. The x-ray computed tomography method enables both such defects and the defects resulting from the technological process itself (e.g. cracks, delamination, porosity etc.) to be detected, and their parameters determined, e.g. percentage of porosity, volume and pore shape. The purpose of comparative tests was to evaluate the possibility of applying x-ray computed tomography to the technological quality assessment of multi-layer ceramic moulds. The porosity distribution, which reflects the properties of the tested moulds, was prepared, including the estimated porosity value.

Detailed analyses show that for the A-type test specimens, based on molochite, the total porosity was lower than for the B-type specimens, based on quartz, by 2.6% on average. The A-type specimens featured significantly higher open porosity, in which it exceeded 50% for a half of the test specimens, compared to the total porosity. In addition, they had a significantly higher count of delamination between the individual layers. The B-type specimens, based on a quartz matrix, had a more compact structure, while the average open porosity of the six specimens was 11% of the total porosity.

For the A- and B-type specimens, the pore shape was determined. The results obtained show clearly that large volume pores deviate from the spherical shape. They have a lengthened (irregular) shape. However, the smaller the pore volumes, the higher the count of pores with similar geometric features and nearly-spherical shape.

The impact on finished goods of the defects detected in the moulds must still be determined.

Acknowledgements

This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education under statutory project no. 8043/00 in 2018.

Literatura/References

1. Wiśniewski P., R. Sitek, M.K. Koralnik, W.L. Spychalski, D. Moszczańska, J. Mizera. 2017. „Investigations of coolings process of ceramic shell samples by using a thermographic camera". *Ceramic Materials* 69 (2) : 146−153.

2. Matysiak H., J. Ferenc, J. Michalski, Z. Lipiński, G. Jakubowicz, K.J. Kurzydłowski. 2011. „Porowatość i wytrzymałość form ceramicznych wykorzystywanych w procesie odlewania precyzyjnego metodą Bridgmana". *Inżynieria Materiałowa* 32 (1) : 17−21.

3. Koralnik M.K, P. Wiśniewski, J. Mizera. Badanie porowatości ceramicznych form odlewniczych dla przemysłu lotniczego. *IX Interdyscyplinarna Konferencja Naukowa TYGIEL 2017, Lublin, Poland*.

4. Zagórska M., M. Małek, P. Wawulska, H. Matysiak, J. Michalski, K.J. Kurzydłowski. 2012. Charakterystyka właściwości form ceramicznych wytworzonych na bazie wodnych spoiw Keysol i Matrixsol. *XL Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków, 24−27 IX 2012.*

5. Tchórz A., Ł. Boroń. 2013. Quantitative characteristics of morphology 3d graphite ductile iron with x-ray CT scan. In Pacyna J. (Ed.), *Papers of Materials Engineering* (p. 392) . Krynica: PAN.

6. Lesiak P., Tchórz A. 2015. Badania eksperymentalne spoin termitowych szyn kolejowych metodą rentgenowskiej tomografii komputerowej. W *Projektowanie, budowa i utrzymanie Infrastruktury w transporcie szynowym*, 177−188. Infraszyn Zakopane 2015.

7. Ratajczyk E. 2012. „Rentgenowska tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych". *Pomiary Automatyka Robotyka* 16 (5) : 104−113.

8. Berdychowski M. 2014. *Zastosowanie modeli porowatych biomateriałów w procesach projektowania i symulacji*. Praca doktorska. Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu.

9. Haratym R., J. Lewiński, R. Biernacki, T. Kowaluk. 2012. „Anizotropia właściwości fizycznych form ceramicznych wpływających na ekologiczne wytwarzanie aluminiowych odlewów precyzyjnych". *Archives of Foundry Engineering* 12 (sp. is. 1) : 53−56.

10. Biernacki R., J. Grześ, R. Haratym, J. Tomasik. 2014. „Ceramic Mould Internal Structure Anomalies in the Lost Wax Process". *Archives of Foundry Engineering* 14 (sp. is. 1) : 57−62.

Open Access. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 (CC BY-SA 3.0).