

Zastosowanie technologii druku 3D do wykonania rdzenia formy odlewniczej oraz jego kontrola wymiarowa z wykorzystaniem skanera 3D

Application of 3D printing technology to make the core of casting mould and dimensional control using a 3D scanner

Andrzej Fijolek^{1*}, Jagoda Ryba¹, Paweł Żak¹, Janusz Lelito¹

¹Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

¹AGH – University of Science and Technology, Department of Foundry Processes Engineering, ul. Reymonta 23, 30-059 Krakow, Poland

*Corresponding author: and.fijolek@gmail.com

Received: 01.08.2018. Accepted in revised form: 30.09.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iiod.2018.09

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie i zamodelowanie poszczególnych elementów technologii odlewniczej dla wykonywania odlewu wentylowanej tarczy hamulcowej z wykorzystaniem narzędzi CAD: program SolidWorks, a następnie wydruk rdzenia przy wykorzystaniu drukarki 3D LS ONE firmy Sand Made sp. z o.o. Następnie gotowy rdzeń został zeskanowany skanerem 3D MetraScan 70. Uzyskany w tym procesie wirtualny model został wykorzystany do kontroli wierności wykonania wydruku rdzenia w stosunku do zaprojektowanego w programie CAD obiektu. Kontrolę wymiarową zaprojektowanego modelu 3D rdzenia w stosunku do rzeczywistego obiektu przeprowadzono w oprogramowaniu Geomagic Control. Wykonana kontrola wymiarowa pozwoliła na weryfikację odchyleń wymiarowych wydrukowanego rdzenia w stosunku do jego projektu 3D wykonanego w oprogramowaniu CAD – SolidWorks. Końcowym efektem pracy był gotowy rdzeń formy odlewniczej, który po włożeniu do formy może zostać wykorzystany w procesie odlewniczym.

Słowa kluczowe: projektowanie CAD, wydruk 3D, skanowanie 3D, forma odlewnicza, rdzeń formy odlewniczej

Abstract

The aim of the work was to develop and model individual elements of casting technology for the casting of a ventilated brake disc using CAD program: SolidWorks, followed by printing a core using a 3D LS ONE printer from Sand Made Ltd. Next, the finished core was scanned with the 3D MetraScan 70 scanner. The virtual model obtained in this process was used to control the fidelity of print performance in relation to the object designed in the CAD program. Dimensional control designed 3D model of the core in relation to the real object was performed in Geomagic Control software. Dimensional control made the verification of dimensional deviations printed core in relation to its project in 3D CAD software – SolidWorks. The end result was ready core for casting mold, which is inserted into the mold can be used in the foundry process.

Keywords: CAD design, 3D printing, 3D scanning, mould, core

1. Wprowadzenie

Odlewnictwo jest metodą wytwarzania elementów za pomocą ciekłego stopu odlewniczego, który wypełnia

1. Introduction

Casting process is a method of making elements using a liquid casting alloy that fills the mould cavities

wnęki formy, odtwarzając kształt założonego odlewu. Ciekły metal doprowadzany jest do wnętrza formy za pomocą układu wlewowego. W skład układu wlewowego wchodzi m.in. elementy, takie jak: zbiornik wlewowy, wlew główny, wlew rozprowadzający (belka wlewowa), wlew doprowadzający, nadlew, przelew i ochładzalniki. Dodatkowo, gdy technologia jest bardziej skomplikowana, stosuje się również rdzenie w przypadku, gdy kształt odlewanej części nie może zostać odtworzony przez samą formę [1–4].

Tarcze hamulcowe wykonywane są głównie z żeliwa. Zastosowanie tarcz hamulcowych w branży motoryzacyjnej sprawia, iż muszą one spełniać odpowiednie wymagania konstrukcyjno-użytkowe. Jej wymiary muszą umożliwić przeniesienie maksymalnej ilości energii kinetycznej i jej późniejszą zmianę na energię cieplną podczas hamowania. Ponadto jej odporność na zużycie musi być jak największa, bowiem niezawodność hamulców jest fundamentalnym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo jazdy. Wobec powyższego proces ich produkcji wymaga doboru nie tylko właściwej technologii, ale również rygorystycznych procedur kontrolnych we wszystkich fazach wytwarzania i eksploatacji. Główną funkcją tarczy jest przekazanie odpowiedniej siły hamowania i rozproszenie wytwarzającego się ciepła. Wymienione funkcje mogą spełniać liczne materiały konstrukcyjne, w praktyce jednak, głównie ze względu na stabilność struktury, koszty materiału i łatwość obróbki, materiałem powszechnie stosowanym jest żeliwo [5].

Techniki przyrostowe, nazywane też drukiem 3D, to nowe i dynamicznie rozwijające się metody wytwarzania elementów. Pierwszą metodą przyrostową – stereolitografię – opracowano w 1986 roku i od tego czasu pojawiały się kolejne – LOM, FDM, SLS, SLM, JM, 3DP i inne [6,7].

Systematyczne prowadzenie prac projektowych oraz przygotowanie produkcji w przemyśle odlewniczym jest w chwili obecnej oparte na komputerowych narzędziach systemowych. Do podstawowych narzędzi wspomagających pracę inżyniera zalicza się systemy wspomagania komputerowego projektowania CAD (*Computer Aided Design*), systemy komputerowo wspomaganą analizy CAE (*Computer Aided Engineering*), systemy komputerowego wspomaganie wytwarzania CAM (*Computer Aided Manufacturing*), jak również systemy szybkiego wytwarzania prototypów RP (*Rapid Prototyping*). Systemy szybkiego wytwarzania prototypów pozwalają na wytworzenie trójwymiarowych modeli fizycznych na podstawie wcześniej zaprojektowanego modelu 3D w oprogramowaniu CAD. Połączenie możliwości systemów CAD/CAM/CAE/RP oraz skanowania 3D pozwalają na znaczne przyspieszenie prac projektowych i wdrożeniowych. Analizując systemy RP, należy stwierdzić, że określenie szybkie prototypowanie (*Rapid Prototyping* – RP) w ogólnym znaczeniu w polskiej terminologii oznacza szybkie wytwarzanie prototypów. W terminologii anglojęzycznej określenie *Rapid*

by recreating the shape of a cast. The liquid metal is fed to the mould cavity by means of an gating system. The gating system includes elements, such as: pouring basin, main filler, runner (filler beam), infusion, feed, overflow, coolers. Additionally, when the technology is more complicated, the cores are also used when the shape of a cast element can not be reproduced by the casting mould itself [1–4].

Brake discs are mainly made of cast iron. The use of brake discs in the automotive industry means that they must meet the relevant construction and application requirements. Its dimensions must allow for the transmission of maximum kinetic energy and its later change to thermal energy during braking. In addition, its resistance to wear must be as high as possible, because the reliability of the brakes is a fundamental factor affecting for safety driving. Therefore, the process of their production requires the selection of not only the right technology, but also rigorous control procedures in all phases of production and exploitation. The main function of the shield is to transmit the appropriate braking force and to dissipate the heat generated. The aforementioned functions can be fulfilled by numerous construction materials, but in practice, mainly due to structural stability, low material costs and ease of machining. The material commonly used for brake discs is cast iron [5].

Additive techniques, also known as 3D printing, is a new and dynamically developing manufacturing methods items. The first method of incremental – stereolithography – was developed in 1986 year and since there were more-LOM, FDM, SLS, SLM, JM, 3DP and other [6,7].

The systematic carrying out design work and production in the foundry industry is at the moment, the computer-based system tools. The basic tools are a computer support systems engineer support CAD (Computer Aided Design), CAE Analysis assisted computer systems (Computer Aided Engineering), computer-aided systems production of CAM (Computer Aided Manufacturing), as well as a quick-manufacture systems prototyping RP (Rapid Prototyping). Rapid prototype manufacturing systems allow to create 3D physical models based on previously designed 3D model in CAD software. Combination of CAD/CAM/CAE systems RP and 3D scanning allow to significantly speed up the design and deployment. By analysing systems, it should be noted that the term Rapid Prototyping (RP) in general meaning in Polish terminology means fast production of prototypes. In English the term Rapid Prototyping is most commonly used in relation to incremental methods of manufacturing the prototypes [6,8,9].

Prototyping jest najczęściej używane w stosunku do przyrostowych metod wytwarzania prototypów [6,8,9].

2. Metoda badań i wyniki

2.1. Zaprojektowanie technologii odlewniczej i modelu 3D rdzenia formy odlewniczej w oprogramowaniu SolidWorks

Początkowym etapem pracy było zaprojektowanie w programie CAD technologii odlewniczej wykonania wentylowanej tarczy hamulcowej, która jest przedstawiona na rysunku 1.

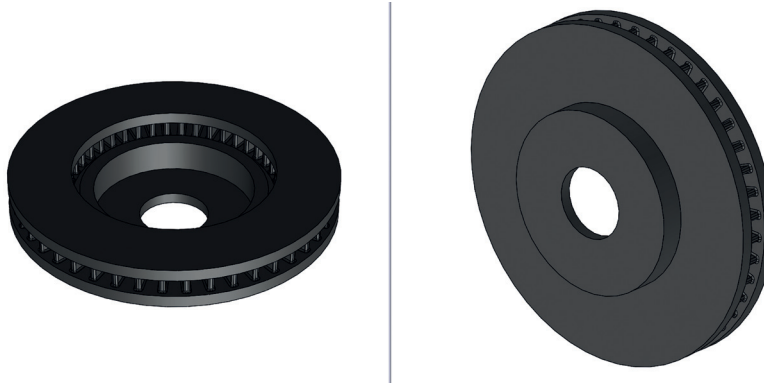
Opierając się na zasadach projektowania [1–4] przygotowano kilka wariantów technologii. Zastosowanie programu SolidWorks [10] pozwoliło na wierne odwzorowanie założonych pozycji i wymiarów wlewów doprowadzających do wnęki formy na rdzeniu. Na tej podstawie przeprowadzono serię symulacji numerycznych procesu wypełniania wnęki formy oraz krzepnięcia w programie MAGMASOFT® [11], które pozwoliły na wybór najlepszego pod względem uzyskania odlewu wentylowanej tarczy hamulcowej wariantu technologii. Wizualizacja wybranej technologii prezentowana jest na rysunku 2.

2. Experiment and results

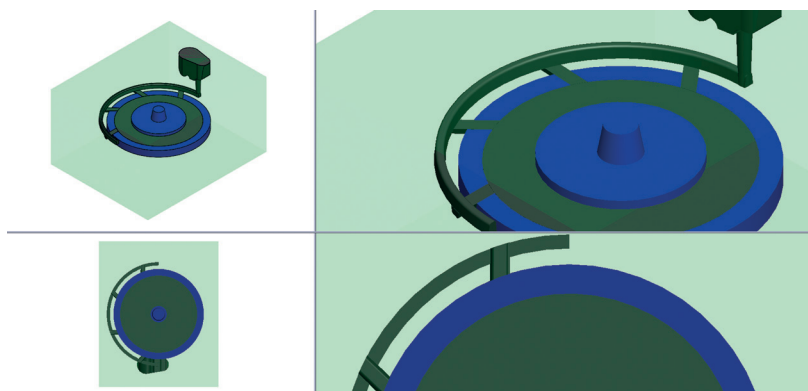
2.1. Designing the casting technology and the 3D model of mould core in the SolidWorks software

The first phase of the work was to design foundry technology in CAD software implementation of a ventilated brake disc, which is shown in the Figure 1.

Based on the principles of design [1–4] several variants of the technology was prepared with used SolidWorks software [10]. This allowed the faithful representation of the established position and dimensions of the gating to the mould cavity on the core. On this basis, conducted a series of numerical simulations of the process of filling the mould cavity, and solidification in MAGMA software [11], that allowed for a selection of the best in terms to obtain cast ventilated brake disc variant of the technology. Visualization of the selected technology is presented in Figure 2.



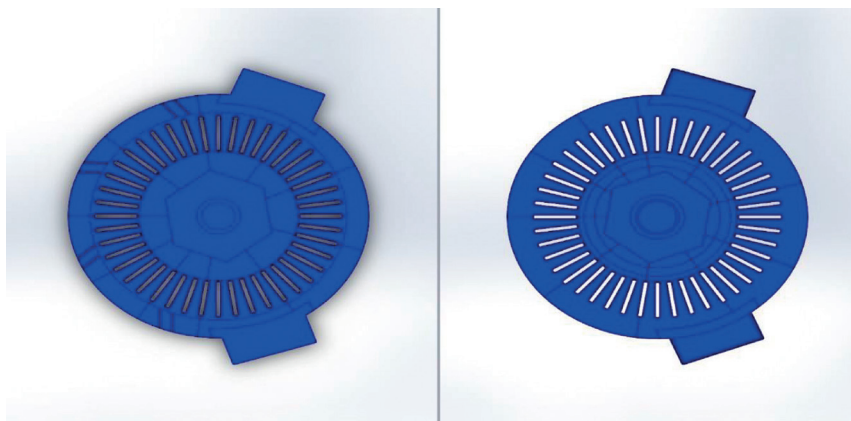
Rys. 1. Projekt wentylowanej tarczy hamulcowej
Fig. 1. Project of the ventilated brake disc



Rys. 2. Projekt formy odlewniczej w programie CAD
Fig. 2. Design of mould in CAD software

Z uwagi na fakt, że stosowanie technik *Rapid Prototyping* (RP) częstokroć ogranicza wielkość elementów, które można wykonać (ograniczenie obszaru roboczego urządzeń), zaprojektowany detale został podzielony na mniejsze elementy. W tym przypadku do wydruku 3D wykorzystano wirtualny model rdzenia formy odlewniczej – element oznaczony kolorem niebieskim na rysunku 3.

In view of the fact that the application of the techniques of Rapid Prototyping (RP) often reduces the size of items that can do (work area). Designed detail has been divided into smaller pieces. In this case, to 3D print were used the virtual model of the core mould-element in blue colour in Figure 3.



Rys. 3. Projekt rdzenia formy odlewniczej z widocznym podziałem na mniejsze elementy, okno programu SolidWorks

Fig. 3. Project of core with a division into smaller elements, the SolidWorks window

Opracowano podział formy odlewniczej wraz z rdzeniem na mniejsze obiekty, tak aby dany obiekt mieścił się w polu roboczym drukarki – osie $X \times Y \times Z$ [mm³]: $150 \times 150 \times 150$ [mm³] – rysunek 3.

Wszystkie poszczególne elementy rdzenia zapisano w formacie STL. Utworzone elementy, zapisane w tym formacie, mogły być wykorzystane do wydruku 3D.

Developed the division of mould along with smaller objects, so that the object was in the printer working-axes $X \times Y \times Z$ [mm³]: $150 \times 150 \times 150$ [mm³] in Figure 3.

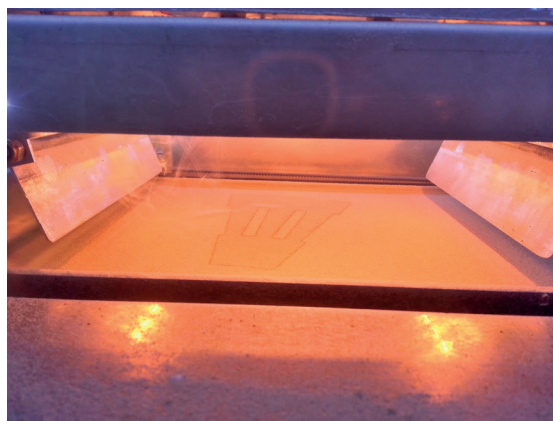
All of the individual core element saved in STL format. Created the items, saved in this format can be used for 3D print.

2.2. Wydruk 3D zaprojektowanego rdzenia i klejenie poszczególnych elementów

Następnie przystąpiono do wydruku 3D poszczególnych elementów. Na rysunku 4 widoczny jest zarys konturów jednego z drukowanych elementów.

2.2. 3D print of the designed core and gluing of individual elements

The next step of the work was 3D print individual core elements. In Figure 4 shows the outline of the contours one of the printed item.



Rys. 4. Widok urządzenia LS ONE podczas wykonywania elementu rdzenia
Fig. 4. View the device during the execution of the core item in LS ONE device

Gotowe elementy zostały przedstawione na [rysunku 5](#). Poszczególne elementy wydrukowanego rdzenia zostały ponumerowane w celu odpowiedniego złożenia i sklejania zgodnie z wcześniej przygotowanym projektem.



Rys. 5. Rdzeń wraz z oznaczonymi elementami
Fig. 5. Core along with the marked items

Finalnym etapem było klejenie poszczególnych elementów. Do scalenia elementów wykorzystano klej PULIT Kernkleber P przeznaczony do klejenia elementów form odlewniczych. Po upływie około 24 godzin wydrukowane elementy rdzenia sklejone tym klejem uzyskują odpowiednią sztywność na łączeniach. Dzięki temu sklejony detal można przenosić bez obaw o zniszczenie.

[Rysunek 6](#) przedstawia widok sklejonego rdzenia. Następnym etapem było skanowanie 3D gotowego elementu w celu sprawdzenia jego dokładności wymiarowej w stosunku do projektu wykonanego w programie CAD.

Finished parts are shown in [Figure 5](#). The individual elements of the printed core have been numbered in order to assembling and gluing in accordance with previously prepared project.

The final step was to glue the individual elements. To merge items used glue PULIT Kernkleber P suitable for gluing casting moulds. After about 24 hours printed core was glued together with this adhesive are granted the appropriate stiffness in the gaps. Thanks to this, the glued detail can be moved without fear of destruction.

[Figure 6](#) presents a view of a glued core. The next step was the 3D scanning finished item. This process allows detected its dimensional accuracy in relation to the project made in CAD software.



Rys. 6. Sklejony rdzeń
Fig. 6. Glued core

2.3. Skanowanie 3D i kontrola wymiarowa

Skanowanie 3D i kontrolę wymiarową rzeczywistego obiektu rdzenia wykonanego w technice *Rapid Prototyping* przeprowadzono za pomocą urządzeń: skanera 3D MetraScan 70 oraz urządzenia C-Track 780. Specyfika-

2.3. 3D scanning and dimensional inspection

3D scanning and dimensional control real object core in the Rapid Prototyping technique was carried out with the help of devices: 3D scanner MetraScan 70 and C-Track 780. Technical specification of each device is shown in [Table 1](#) and [Table 2](#).

cja techniczna poszczególnych urządzeń przedstawiona jest w tabeli 1 oraz w tabeli 2.

Tabela 1. Specyfikacja techniczna skanera optycznego MetraScan 70 [12]
 Table 1. The technical specifications of the optical scanner MetraScan 70 [12]

Waga, kg / Weight, kg	Wymiary, mm / Dimensions, mm	Prędkość pomiarów, punktów/s / Speed of measurements, points/s	Dokładność, µm / Precision, µm	Rozdzielczość skanowania, mm / Scan resolution, mm	Optymalna odległość skanowania, mm / The optimal scanning distance, mm
1,85	282 × 250 × 282	36 000	85	0,05	152
Głębokość ostrości, mm / Depth of field, mm	Długość laserowego krzyża, mm / The length of the laser cross, mm	Zakres temperatury pracy, °C / Operating temperature range, °C	Zakres wilgotności urządzenia, % / Humidity range equipment, %	Certyfikacje/Certifications	
±50	70 × 70	15–40	10–90	EN 301 489, EN 301 489-3, EN 300 220-1	

Tabela 2. Specyfikacja techniczna urządzenia C-Track 780 [13]
 Table 2. Technical specification of the C-Track 780 device [13]

Dokładność, µm / Precision, µm	Powtarzalność punktowa, m ³ / The repeatability of the point, m ³			Dokładność objętościowa, m ³ / Volume precision, m ³				Dokładność przestrzenna z wykorzystaniem MaxSHOT 3D lub C-Link), m / Spatial precision using MaxSHOT 3D or C-Link, m	Prędkość pomiarów, Hz / Speed of measurements, Hz	Certyfikacje/ Certifications
do 25 / to 25	3,80	7,80	14,80	3,80	7,80	14,80	do 1,2	powyżej 1,2 / after 1.2	30	EN 301 489-1, EN 301 489-3, EN 300 220-1
	50	55	nie dotyczy / not applicable	80	85	nie dotyczy / not applicable	85	55 + 25, µm/m		

Przed przystąpieniem do procesu skanowania 3D przygotowano odpowiednie stanowisko, na którym znajdował się sklejony rdzeń – rysunek 7.

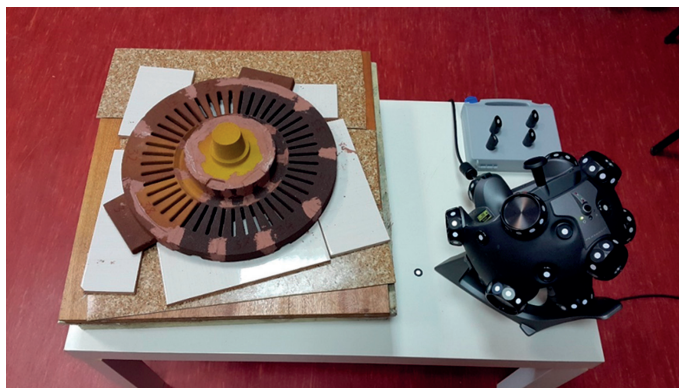
Następnie rozłożono markery na naroża przygotowanego stanowiska. Rozłożone markery znacznie ułatwiły procedurę łączenia uzyskanych skanów.

Po wykonaniu kalibracji skanera 3D rozpoczęto skanowanie dolnej części rdzenia. W celu zachowania stabilności podczas skanowania 3D obiekt znajdował się na wcześniej przygotowanym stanowisku (wykorzystanym również podczas klejenia) oraz pozostał nieruchomy względem skanera. Wiązka lasera „padająca” na wydrukowany rdzeń odtwarzała jego kształt. Problem stanowiły szczeliny odtwarzające otwory wentylacyjne.

Before of 3D scanning proces, the correct position was prepare for core – Figure 7.

Then deployed with the markers at the corner prepared position. Procedure connected scans was much easier with striped markers.

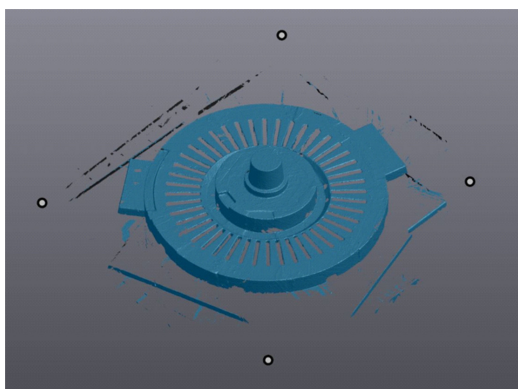
After calibration 3D scanner, started scanning the bottom part of the core. In order to maintain stability during the scan, 3D object on the previously prepared position used when gluing and remained stationary relative to the scanner. The laser beam “hitting” on printed core ran his shapes. The problem were the reproduced vents holes.



Rys. 7. Stanowisko do procesu skanowania 3D
Fig. 7. Position to the 3D scanning process

Podczas skanowania obiektu na ekranie komputera zintegrowanego ze skanerem 3D w programie VXelements był generowany wirtualny kształt skanowanego obiektu. Końcowy efekt skanowania 3D dolnej części rdzenia wraz z widocznymi markerami jest przedstawiony na rysunku 8.

During the scan of an object on a computer screen integrated with 3D scanner in VXelements, software was generated virtual shape of the scanned object. The final effect of the 3D scanning – the bottom of the core, along with visible markers is shown in Figure 8.



Rys. 8. Skan 3D dolnej części rdzenia z widocznymi markerami
Fig. 8. The 3D scan of the lower part of the core with visible markers

Następnie wykonano skan 3D górnej części rdzenia. Przed przystąpieniem do dalszego skanowania należało obrócić element na przygotowanym stanowisku (rys. 9).

Procedura skanowania 3D górnej części rdzenia przebiegała w taki sam sposób, jak podczas skanowania dolnej części. Po zakończonym procesie skanowania górnej części rdzenia uzyskano skan 3D przedstawiony na rysunku 10.

Kolejnym etapem było połączenie dwóch zeskanowanych części rdzenia. Oczyszczono wykonane skany 3D przedstawione na rysunku 8 i rysunku 10 z niepożądanymi konturami stanowiska, na którym był skanowany element.

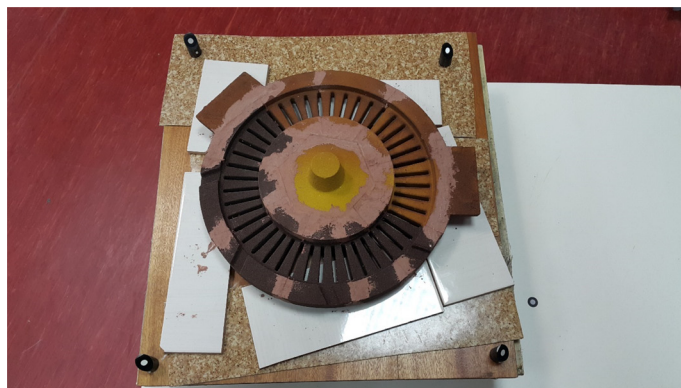
Następnie do programu Geomagic Control 2015 (64 bit) [14] zaimportowano projekt rdzenia wykonanego w programie CAD – SolidWorks. Kolejnym krokiem było „nałożenie” połączonych skanów 3D (rys. 11) na wcześniej zaimportowany obiekt wy-

After that the 3D scan was made of the top part core. Before continue scanning, core was turn the item on a prepared position (Fig. 9).

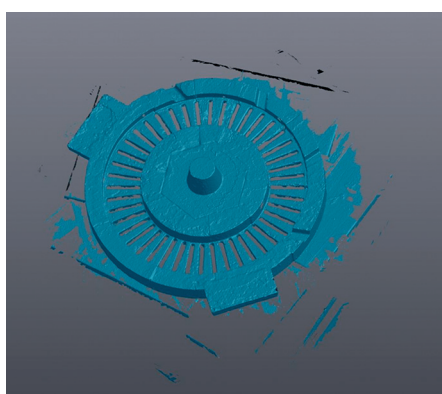
Procedure for 3D scanning the top of the core proceeded in the same way as when scan the bottom. After the completion of the 3D scanning process – the front part of the core obtained 3D scan shown in the Figure 10.

The next step was to combine two scanned part of the core. 3D scans was purified and presented in Figure 8 and Figure 10 of the unwanted outlines position on which was scanned the item.

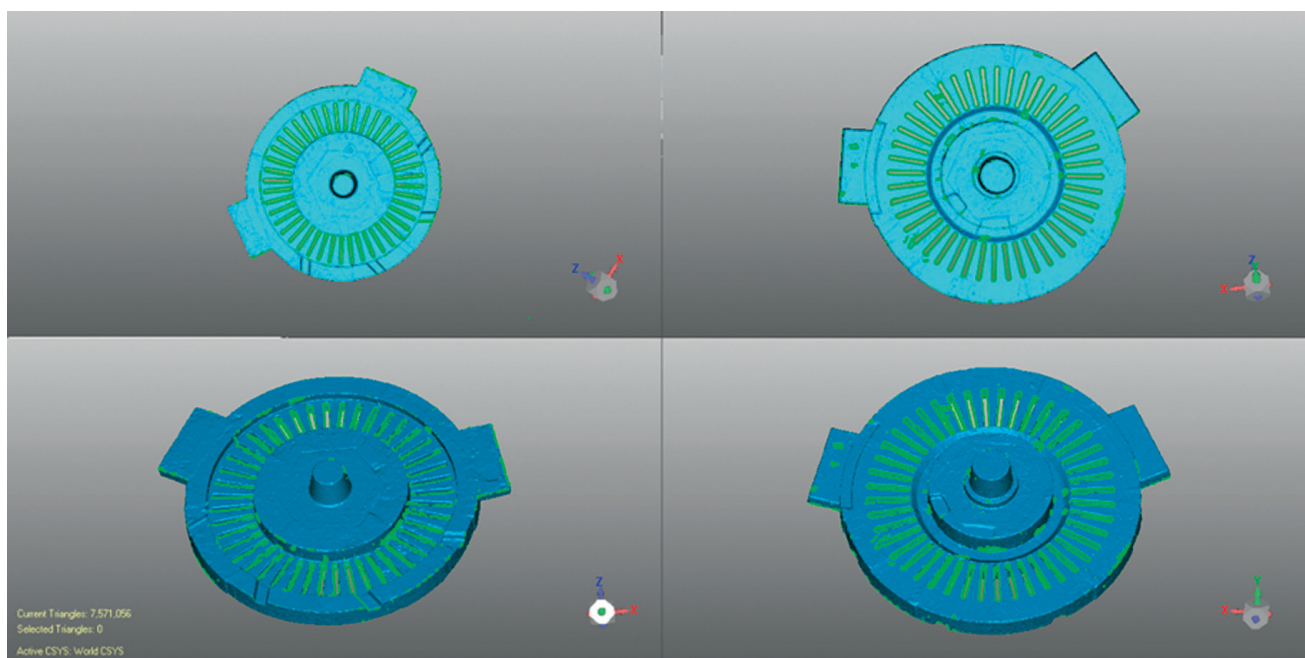
Then to the program Geomagic Control 2015 (64 bit) [14] geometry was imported from CAD software – SolidWorks. The next step was to “impose” connected 3D scan (Fig. 11) to the imported object made in CAD software. Next the files were exported in STL. This project could be submit for dimensions inspection.



Rys. 9. Przygotowanie do skanowania 3D górnej części sklejonego rdzenia
Fig. 9. Prepare for 3D scanning the top of the glued core



Rys. 10. Skan 3D górnej części rdzenia
Fig. 10. 3D scan the top part of the core



Rys. 11. Połączone skany 3D dolnej i górnej części rdzenia
Fig. 11. The combined 3D scans upper and lower core

konany w programie CAD. Pliki wyeksportowano w rozszerzeniu STL. Tak przygotowany projekt mógł zostać poddany kontroli wymiarowej.

3. Dyskusja wyników

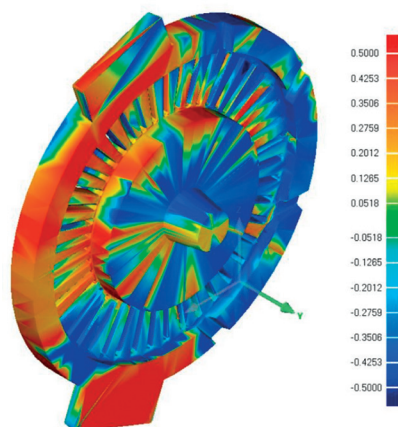
Program Geomagic Control 2015 (64 bit) wygenerował wyniki niezgodności geometrii dla porównywanych obiektów. Wyniki te pokazują, jakie są odchylenia wymiarowe rzeczywistego obiektu (wydrukowanego rdzenia) w stosunku do jego wirtualnego projektu wykonanego w programie SolidWorks (rys. 12–18).

Przeprowadzona kontrola wymiarowa rzeczywistego detalu wydrukowanego w technologii *Rapid Prototyping* rdzenia z porównanym wirtualnym projektem wykonanym w programie CAD bardzo dokładnie obrazuje, jakie są odchylenia wymiarowe w stosunku do rzeczywistego elementu (rys. 12–18). Wyniki pokazują, w jaki sposób wymiary rzeczywistego obiektu rdzenia w stosunku do jego wirtualnego projektu różnią się (tab. 3, 4).

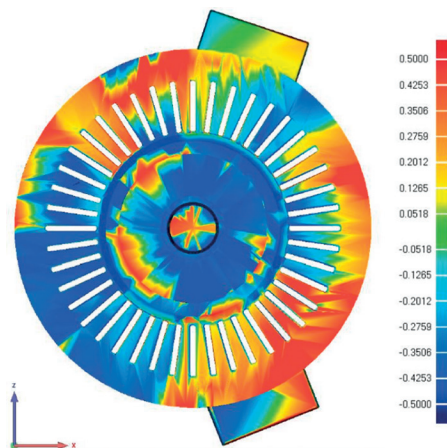
3. Discussion of the results

Software Geomagic Control 2015 (64 bit) was generated the results of non-compliance the geometry for the compared objects. These results show what are the dimensional deviations compared to the real object (3D printed core) in relation to its virtual project made in SolidWorks software (Figs. 12–18).

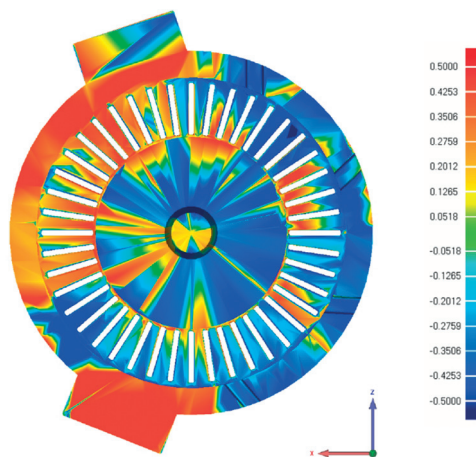
Dimensional control was carried out of the real part printed in the Rapid Prototyping technology core compared with virtual design in CAD, very exactly illustrates what are the dimensional deviation in relation to the real element (Figs. 12–18). The results show how the dimensions of the real object of the core in relation to its virtual project differences (Table 3 and Table 4).



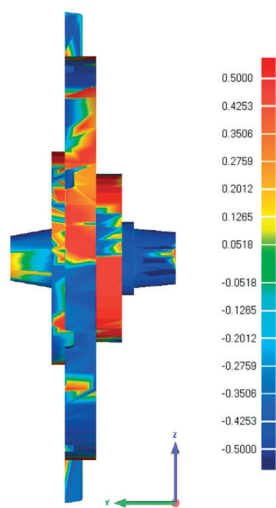
Rys. 12. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku izometrycznym – wartości w mm
 Fig. 12. The results of the core dimensional control presented on isometric view – values in mm



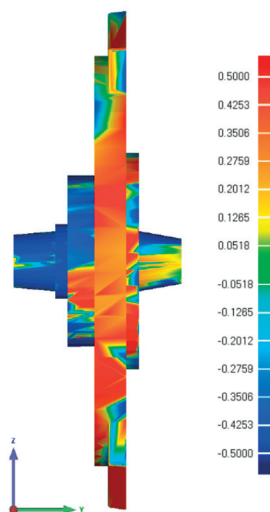
Rys. 13. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku z dołu – wartości w mm
 Fig. 13. The results of the core dimensional control presented on the bottom view – the values in mm



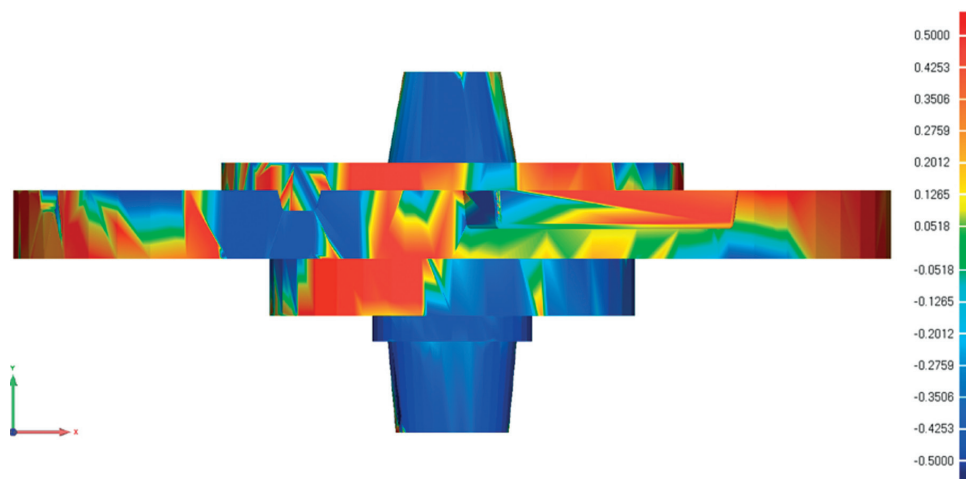
Rys. 14. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku z góry – wartości w mm
Fig. 14. The results of the core dimensional control presented on the top view – the values in mm



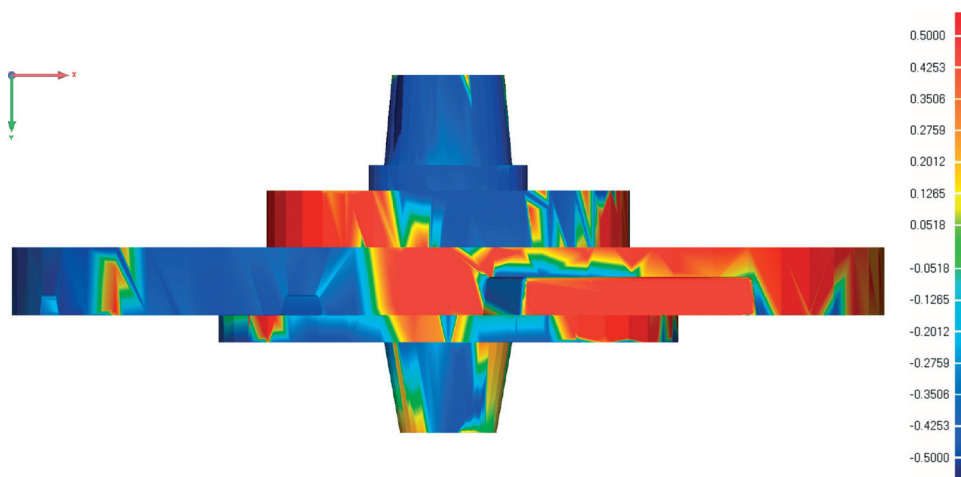
Rys. 15. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku z prawej strony – wartości w mm
Fig. 15. The results of the core dimensional control presented on the right side view – the values in mm



Rys. 16. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku z lewej strony – wartości w mm
Fig. 16. The results of the core dimensional control presented on the left side view – the values in mm



Rys. 17. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku z przodu – wartości w mm
 Fig. 17. The results of the core dimensional control presented on the front view – values in mm



Rys. 18. Wyniki kontroli wymiarowej rdzenia przedstawione na widoku z tyłu – wartości w mm
 Fig. 18. The results of the core dimensional control presented on the back view – the values in mm

Tabela 3. Parametry odchylenia 3D przeprowadzonej kontroli wymiarowej rdzenia

Table 3. The 3D dimensional control deviation parameters of the core

Typ tolerancji / Type of tolerance	Odchylenie 3D / 3D deviation
Jednostki/Unit	mm
Maksymalne odchylenie krytyczne / The maximum critical deviation	0,5000
Maksymalne odchylenie nominalne / The maximum nominal deviation	0,0518
Minimalne odchylenie nominalne / The minimum nominal deviation	-0,0518
Minimalne odchylenie krytyczne / The minimum critical deviation	-0,5000

Tabela 4. Parametry rozkładu odchylenia
Table 4. The parameters of the distribution of deviations

>=Min, mm	<Max, mm	Liczba punktów / The number of points	Udział, % / The share of %
-0,5000	-0,4253	114 231	4,1920
-0,4253	-0,3506	167 886	6,1610
-0,3506	-0,2759	224 688	8,2455
-0,2759	-0,2012	272 198	9,9890
-0,2012	-0,1265	290 570	10,6632
-0,1265	-0,0518	293 134	10,7573
-0,0518	0,0518	390 103	14,3158
0,0518	0,1265	278 412	10,2170
0,1265	0,2012	233 186	8,5574
0,2012	0,2759	156 991	5,7612
0,2759	0,3506	120 711	4,4298
0,3506	0,4253	101 200	3,7138
0,4253	0,5000	81 668	2,9970

Osoba, która realizowała projekt musi ocenić, czy odchylenia wymiarowe będą miały wpływ na późniejsze zastosowanie wydrukowanej części. W przypadku, gdy element poddany kontroli będzie miał nadatki wymiarowe można go poddać obróbce i usunąć zbędny materiał. Natomiast element, który posiada luki w swoim kształcie, wymaga dodatkowego uzupełnienia np. przez doklejenie dodatkowego elementu odpowiednio dopasowanego, by uzupełnić powstałą lukę. Analiza w postaci barwnych map pozwala na łatwe zlokalizowanie takich obszarów.

Przeprowadzona kontrola odchyżeń wymiarowych umożliwia ocenę, czy dany element może zostać wpasowany do pozostałych elementów stanowiących złożenie formy odlewniczej. Przedstawione wyniki odchyżeń wymiarowych dla rdzenia mieszczą się w granicach tolerancji, tzn. powstałe odchylenia wymiarowe są niewielkie i można je wyeliminować wcześniej opisanymi metodami.

4. Wnioski

Praca pokazuje zastosowanie oprogramowania CAD do skonstruowania wirtualnych modeli elementów technologii odlewniczej, która może być zastosowana w celu uzyskania rzeczywistego odlewu. Opracowano technologię odlewniczą wykonania wentylowanej tarczy hamulcowej przy użyciu nowatorskich narzędzi w postaci oprogramowania: CAD – SolidWorks oraz weryfikację możliwości wykonania tego odlewu dzięki zastosowaniu programu symulacyjnego MAGMASOFT®.

Wybrany element tej technologii – rdzeń odlewniczy – został wytworzony w technologii *Rapid Prototyping*. Wydrukowany rdzeń odtwarza żebra wentylacyjne tarczy hamulcowej. Na przykładzie wydrukowanego elementu opisano proces technologii druku 3D form odlewniczych przy wykorzystaniu urządzenia LS ONE firmy Sand Made sp. z o.o.

The person which implemented the project must assess whether the dimensional deviation will have an impact on the subsequent use of the printed parts. In the case when the item inspected will have surpluses dimensional can be treated and remove redundant material. While the item that has a gap in his shape requires an additional supplement for example by adding an additional element fitted respectively to make up the gap. The analysis in the form of a colorful map allows to easily locate such areas.

Dimensional deviations made allows the assessment of whether a given item can be fit to the rest of the elements constituting the filing of mould. Presented the results of dimensional deviations for the core fall within the limits of tolerance. The resulting dimensional deviations are minor and can be eliminate them previously described methods.

4. Conclusions

The work shows application of CAD software to create virtual models elements of casting technology that can be applied to obtain the real casting. Casting technology has been developed the implementation of ventilated brake disc with using innovative tools in the form of software: CAD-SolidWorks and verifying the feasibility of casting using simulation in MAGMA software.

The selected item, this technology – core, part of casting mould was produced with Rapid Prototyping technology. Printed core reproduces ribs ventilation disc. For example, a printed item describes the process of 3D printing technology casting moulds using the LS ONE device – Sand Made Ltd. company.

Techniki formowania przyrostowego (RP) stwarzają ogromne możliwości w przemyśle odlewniczym. Wdrożenie procesu produkcyjnego wiąże się z próbami technologicznymi, a także z wykonaniem zespołu modelowego, który po zaformowaniu daje możliwość uzyskania finalnej formy. Dzięki drukowaniu 3D form odlewniczych można uniknąć: konstruowania dodatkowego zespołu modelowego oraz rdzennic, nanoszenia pochyleń odlewniczych na model czy wyznaczenia powierzchni podziału.

Główną wadą wytwarzania form odlewniczych przy wykorzystaniu technik *Rapid Prototyping* jest stosunkowo długi czas wykonywania wydruku. Wada ta może stanowić znaczne utrudnienie, gdy odlewnia nastawiona jest na produkcję seryjną i zamówienia są realizowane w tysiącach sztuk. W takim przypadku wydruki 3D form i rdzeni się nie sprawdzą, ponieważ proces produkcyjny będzie znacznie opóźniony.

Incremental forming technique (RP) offer great opportunities in the foundry industry. Implement manufacturing process involves the attempts to exploit this technology, as well as, with the implementation of the casting models, which after the forming process gives the opportunity to obtain the final form. Application 3D printed moulds in foundry can be avoided: construct additional casting models and core boxes, application of draft in model casting, designate the split casting model.

The main disadvantage of manufacture moulds using Rapid Prototyping techniques is a relatively long time print parts. This defect may pose a significant obstacle, when the Foundry is geared for mass production and orders are processed in thousands of pieces. In this case, the 3D prints forms and cores do not work because the production process will be significantly delayed.

Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach pracy statutowej AGH o numerze 11.11.170.318 zad. 15.

Acknowledgements

The authors acknowledge financial support from the Polish Ministry of Science and Higher Education for financial support under grant No. 11.11.170.318 zad. 15.

Literatura/References

1. Rączka J.S., A. Tabor, Z. Haduch. 1984. *Odlewnictwo*. Kraków: Politechnika Krakowska.
2. Tabor A., J.S. Rączka. 1998. *Projektowanie odlewów i technologii form*. Kraków: FOTOBIT.
3. Chabowski W. i in. 1972. *Poradnik inżyniera – odlewnictwo*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
4. Rączka J.S. 1979. *Technologia odlewnictwa*. Kraków: Politechnika Krakowska.
5. Tubielewicz K., H. Michalczyk, I. Chmielnik. 2015. Technologia wykonania tarczy hamulcowej, W *XIX Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji 11–15.05.2015 Szczyrk*, Tom 1, 885–894. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna.
6. Fijołek A. 2016. *Zastosowanie technik formowania przyrostowego przy użyciu urządzenia firmy Sand Made sp. z o.o., model LS ONE do wykonania rdzenia formy odlewniczej*. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica (praca magisterska).
7. Siemiński P., G. Budzik. 2015. *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
8. Budzik G., W. Budzik, M. Cygnar, K. Janisz. 2009. „Możliwości zastosowania szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wytwarzania elementów pojazdów samochodowych”. *Problemy Eksploatacji* (1) : 7–16.
9. Skrzypkowski K., K. Zagórski, P. Dudek. 2016. „Zastosowanie drukarki 3D do produkcji prototypowej podkładki kotwowej”, *Przegląd Górniczy* 72 (3) : 52–56.
10. Solidworks – kompletne oprogramowanie 3D. [Online]. Dostępne na: <https://www.solidworks.pl/>. [Udostępniono: 16.07.2018].

11. Startpage MAGMA Europe. [Online]. Dostępne na: <https://www.magma-soft.de/en/>. [Udostępniono: 16.07.2018].
12. Pomiar 3D | Systemy wizyjne 3D – Casp System. [Online]. Dostępne na: <http://www.pomiar3d.pl/pl/>. [Udostępniono: 16.06.2016].
13. Casp System sp. z o.o., Creaform HandyPROBE.
14. Geomagic Control X, 3D Systems. [Online]. Dostępne na: </software/geomagic-control-x/>. [Udostępniono: 16.07.2018].