

Zastosowanie oprogramowania CAD i CAE w celu zaprojektowania i doboru technologii odlewniczej dla odlewu z żeliwa szarego – tarczy hamulcowej

The application of CAD and CAE software to design and selection of foundry technology for casting of grey cast iron – brake disc

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: 14.08.2018. Accepted in revised form: 30.11.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.12

Streszczenie

Opisano proces projektowania technologii odlewniczej pozwalającej uzyskać odlew żeliwny tarczy hamulcowej przy wykorzystaniu narzędzi CAD i CAE. Do obliczeń projektowych poszczególnych układów wlewowych zastosowano wzory powszechnie dostępne w literaturze dotyczącej branży odlewniczej. Obliczenia projektowe, proces projektowania w oprogramowaniu CAD – SOLIDWORKS oraz symulacje numeryczne w oprogramowaniu MAGMASOFT wykonano dla czterech różnych technologii wykonania odlewu. Przeprowadzona analiza pozwoliła na dobranie najkorzystniejszej technologii odlewniczej dla odlewu tarczy hamulcowej. Wybrana technologia odznacza się najlepszą konstrukcją układu wlewowego zarówno pod względem kształtu, jak i jego zasilenia. Ponadto wybrana technologia charakteryzuje się wysokim uzyskiem spośród pozostałych technologii, co prowadzi do ograniczenia kosztów związanych z procesem odlewniczym detalu tarczy hamulcowej.

Słowa kluczowe: projektowanie 3D, technologia odlewnicza, CAD, CAE, symulacja numeryczna

Abstract

Describes the process of casting technology design that produces an iron casting brake disc using CAD and CAE tools. For design calculations of the individual filling and ventilating systems uses the formulas commonly available in the literature for the foundry industry. Design calculations, design CAD software – SOLIDWORKS and numeric simulations MAGMASOFT software made for four different technology. Analysis has allowed the selection of the best casting technology for cast iron brake disc. The selected technology is the best design of the casting system in terms of both shape and its powering. In addition, the selected technology is characterized by high yield out of other technologies, which leads to a reduction of the costs associated with the process of casting part – brake disc.

Keywords: 3D design, casting technology, CAD software, CAE software, numerical simulation

1. Wprowadzenie

Odlewnictwo można zdefiniować jako proces produkcyjny polegający na zalewaniu ciekłym stopem metali wneki formy odlewniczej w celu uzyskania wyrobu

1. Introduction

Casting can be defined as a process in which liquid metal alloy fills the cavity to obtain a product of virtually any shape. Obtaining a product with specific char-

o praktycznie dowolnych kształtach. Uzyskanie produktu o ściśle określonych właściwościach (mechanicznych, wytrzymałościowych, użytkowych oraz fizycznych) wymaga restrykcyjnego przestrzegania warunków procesu technologicznego, w tym również jakości samego ciekłego metalu [1,2].

Tarcza hamulcowa jest ze względu na swoje zastosowania w branży motoryzacyjnej bardzo ważnym elementem układu hamulcowego pojazdu mechanicznego. Układy hamulcowe pod względem konstrukcyjnym w pojazdach mechanicznych praktycznie są niezmiennie na przestrzeni ubiegłych lat. Zasada działania hamulców tarczowego polega na zamianie energii kinetycznej rozprężonego pojazdu oraz jego obracających się kół na energię cieplną elementów układu hamulcowego (tarcze, klocki, okładziny oraz bębny hamulcowe) poprzez występujące tarcie. Dlatego uzyskiwane elementy, takie jak tarcze hamulcowe, w procesie odlewania muszą spełniać odpowiednie wymagania oraz poddawane są wielu weryfikacjom, zanim zostaną umieszczone w układzie hamulcowym pojazdu mechanicznego [3,4].

Zastosowanie metod obliczeniowych i symulacji numerycznych w przemyśle odlewniczym pozwala na przewidywanie i analizę procesów zachodzących podczas zalewania formy ciekłym metalem. Do tych procesów można zaliczyć proces zalewania i krzepnięcia odlewu. Ponadto oprogramowanie po wykonanej symulacji daje możliwości lokalizacji oraz określenie niezgodności występujących w odlewie [3,5-7].

Programy CAD (*Computer Aided Design*) oraz CAE (*Computer Aided Engineering*) znakomicie wspomagają pracę inżyniera nad danym projektem oraz pomagają zrozumieć procesy fizyko-chemiczne zachodzące podczas wypełniania wnętrza formy ciekłym metalem [3,5,8-11].

Wykonanie projektu w programie CAD pozwala przygotować koncepcję wykonania danego detalu metodą odlewniczą zarówno dla jednej, jak i dla kilku różnych technologii, a format zapisu plików jest w pełni kompatybilny z oprogramowaniem CAE [12]. Następnie po imporcie brył do oprogramowania CAE i ustaleniu odpowiednich warunków jednoznaczności można przystąpić do numerycznych obliczeń procesów odlewniczych dla zaprojektowanej technologii lub kilku wybranych technologii w celu wybrania najbardziej korzystnej wersji [13]. Takie postępowanie skutkuje znacznym ograniczeniem kosztów produkcyjnych danego odlewu ze względu na zmniejszenie liczby braków. Ponadto wspomniane narzędzia mogą być wykorzystywane do poprawy jakości odlewów oraz optymalizacji procesu odlewania, np. w celu wybrania najkorzystniejszej technologii odlewania [14].

2. Projekt modeli 3D w oprogramowaniu CAD

Początkowym etapem pracy było przygotowanie poszczególnych modeli 3D: tarczy hamulcowej, tarczy hamulcowej z nadatkami na obróbkę mechaniczną oraz

acteristics (mechanical endurance, performance and physical) requires a restrictive terms of a technological process, including quality of liquid metal [1,2].

Brake disc is due to its use in the automotive industry a very important part of the braking system of a motor vehicle. Braking devices structurally in motor vehicles are virtually unchanged over the past years. The operating principle of disc brakes is the conversion of the kinetic energy of a speeding vehicle and its rotating wheels the thermal energy elements of the braking system (discs, pads, linings and brake drums) by common friction. Therefore, the obtained items such as brake discs, in the casting process must meet the relevant requirements and are subjected to multiple verifications before they are placed in the braking system of a motor vehicle [3,4].

The application of computational methods and numerical simulation in casting industry allows for the prediction and analysis of the processes taking place during the pouring liquid metal form. These processes can include the process of pouring and solidification casting. In addition, the software after the simulation gives possibility of location and determination of non-compliance occurring in cast [3,5-7].

CAD (Computer Aided Design) and CAE programs (Computer Aided Engineering) excellent support engineering work of the project, and help to understand the processes of physico-chemical occurring when liquid metal fill the cavity [3,5,8-11].

Implementation of the project in CAD allows to prepare the concept of the part by casting for both one and several different technologies, and file format is fully compatible with CAE software [12]. Then after import of solids bodies to the CAE software and determine appropriate conditions of clarity, proceed to numeric calculations casting processes for design technology or more of selected technologies in order to select the most preferred version [13]. This results in significant cost savings in production of casting due to the decrease in the number of deficiencies. In addition, these tools can be used to improve the quality of castings and casting process optimization, for example. in order to select the best casting technology [14].

2. Design 3D models in CAD software

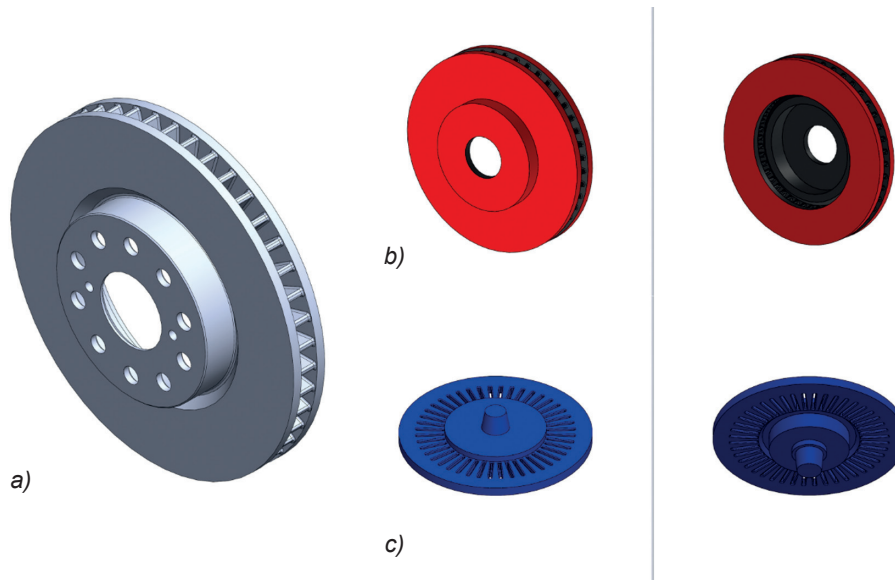
The initial stage of work was the preparation of individual 3D models: brake disc, brake disc with additional material for machining and core in CAD soft-

rdzenia w programie CAD – SOLIDWORKS. Wykonane modele 3D przedstawione są na [rysunku 1](#).

Parametry z modelu tarczy hamulcowej z uwzględnieniem naddatków na obróbkę ([rys. 1b](#)) wykorzystano do obliczeń układu wlewowego.

ware – SOLIDWORKS. Made 3D models are shown in [Figure 1](#).

Parameters from the brake disc model taking into account allowances for treatment ([Fig. 1b](#)) used for calculations gating system.



Rys. 1. Modele 3D wykonane w oprogramowaniu CAD: a) tarcza hamulcowa, b) tarcza hamulcowa z nadatkami na obróbkę mechaniczną, c) rdzeń odtwarzający żebra wentylacyjne

Fig. 1. 3D models made in CAD software: a) brake disc, b) brake disc with additional material for machining, c) core that recreating ventilation ribs

3. Obliczenia technologiczne do wykonania symulacji numerycznej procesu odlewania tarczy hamulcowej

Obliczenia dla układu wlewowego przeprowadzono według wzorów dostępnych w literaturze branżowej [2, 15–18]. Wyniki obliczeń układu wlewowego zostały zestawione w [tabelach 1–4](#).

Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na dobranie odpowiednich przekrojów poszczególnych elementów układu wlewowego. Ponadto została dobrana skrzynia formierska, która nie została uwzględniona podczas symulacji numerycznej, ale może być wykorzystywana do dokumentacji technologicznej m.in. do procesu formowania modelu w skrzyni formierskiej.

Następnie przystąpiono do projektowania 4 wariantów technologii wykonania odlewu tarczy hamulcowej. Przygotowane elementy poszczególnych projektów zaimportowano do oprogramowania CAE – MAGMASOFT, w którym przeprowadzono symulacje numeryczne procesu odlewania.

3. Technological calculation to perform numerical simulation of casting process for brake disc

The calculation for the gating system was carried out according to the designs available in the industry literature [2, 15–18]. The results of the gating system calculations are summarised in [Tables 1–4](#).

Performed calculations allowed for the selection of the appropriate sections of each gating system elements. In addition, was chosen cavity box, which has not been considered during the numerical simulation, but can be used for technological documentation for example to the process of forming sand in the cavity box.

Then commenced the design of 4 variants of the technology cast iron brake disc. Prepared the elements of each project imported to the CAE software – MAGMASOFT, which performed numerical simulations of the casting process.

Tabela 1. Wyniki przeprowadzonych obliczeń układu wlewowego dla technologii nr 1

Table 1. The results of calculations gating system for technology No. 1

Wyniki obliczeń w celu doboru układu wlewowego dla technologii nr 1 / The results of the calculations gating system for technology No. 1				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
1	Ciężar odlewu / The weight of the cast	10,20	10,20	kg
2	Czas zalewania / Pouring time	7,00	7,00	s
3	Prędkość podnoszenia metalu w formie / Velocity metal in the form	8,39	8,39	cm/s
4	Suma minimalnych przekrojów wlewów doprowadzających / The sum of the minimum cross-sections gates	4,72	4,72	cm ²
5	Przekrój wlewów doprowadzających / Gates section	1,18	1,20	cm ²
6	Przekrój belki wlewowej / Runner section	1,44	1,60	cm ²
7	Przekrój wlewu głównego / Sprue section	1,68	1,80	cm ²
8	Pojemność zbiornika wlewowego / Pouring basin capacity	526	714	cm ³
Wyniki obliczeń w celu doboru skrzynki formierskiej i pozostałych parametrów technologicznych dla technologii nr 1 / The results of the calculations to the cavity box and other technological parameters for technology No. 1				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
9	Skrzynia formierska / Cavity box	$L_{min} = 431$ $B_{min} = 501$ $Hd_{min} = 117$ $Hg_{min} = 111,55$	$L = 550$ $B = 450$ $Hd = 150$ $Hg = 150$	mm
10	Ciężar skrzyni formierskiej / The weight of the cavity box	24	24	kg
11	Ciężar masy formierskiej / The weight of the sand	54	54	kg
12	Obciążenie formy / Additional strain on the form	-5	-5	kg

Tabela 2. Wyniki przeprowadzonych obliczeń układu wlewowego dla technologii nr 2

Table 2. The results of calculations gating system for technology No. 2

Wyniki obliczeń w celu doboru układu wlewowego dla technologii nr 2 / The results of the calculations gating system for technology No. 2				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
1	Ciężar odlewu / The weight of the cast	10,20	10,20	kg
2	Czas zalewania / Pouring time	7,00	7,00	s
3	Prędkość podnoszenia metalu w formie / Velocity metal in the form	8,39	8,39	cm/s
4	Suma minimalnych przekrojów wlewów doprowadzających / The sum of the minimum cross-sections gates	4,72	4,72	cm ²
5	Przekrój wlewów doprowadzających / Gates section	0,79	1,00	cm ²
6	Przekrój belki wlewowej / Runner section	1,20	1,20	cm ²
7	Przekrój wlewu głównego / Sprue section	1,40	1,50	cm ²
8	Pojemność zbiornika wlewowego / Pouring basin capacity	526	714	cm ³
Wyniki obliczeń w celu doboru skrzynki formierskiej i pozostałych parametrów technologicznych dla technologii nr 2 / The results of the calculations to the cavity box and other technological parameters for technology No. 2				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
9	Skrzynia formierska / Cavity box	$L_{min} = 431$ $B_{min} = 501$ $Hd_{min} = 117$ $Hg_{min} = 111,55$	$L = 550$ $B = 450$ $Hd = 150$ $Hg = 150$	mm
10	Ciężar skrzyni formierskiej / The weight of the cavity box	24	24	kg
11	Ciężar masy formierskiej / The weight of the sand	54	54	kg
12	Obciążenie formy / Additional strain on the form	-5	-5	kg

Tabela 3. Wyniki przeprowadzonych obliczeń układu wlewowego dla technologii nr 3

Table 3. The results of calculations gating system for technology No. 3

Wyniki obliczeń w celu doboru układu wlewowego dla technologii nr 3 / The results of the calculations gating system for technology No. 3				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
1	Ciężar odlewu / The weight of the cast	10,20	10,20	kg
2	Czas zalewania / Pouring time	7,00	7,00	s
3	Prędkość podnoszenia metalu w formie / Velocity metal in the form	8,39	8,39	cm/s
4	Suma minimalnych przekrojów wlewów doprowadzających / The sum of the minimum cross-sections gates	4,72	4,72	cm ²
5	Przekrój wlewów doprowadzających / Gates section	0,79	1,00	cm ²
6	Przekrój belki wlewowej / Runner section	1,20	1,20	cm ²
7	Przekrój wlewu głównego / Sprue section	1,40	1,50	cm ²
8	Pojemność zbiornika wlewowego / Pouring basin capacity	526	714	cm ³
Wyniki obliczeń w celu doboru skrzynki formierskiej i pozostałych parametrów technologicznych dla technologii nr 3 / The results of the calculations to the cavity box and other technological parameters for technology No. 3				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
9	Skrzynia formierska / Cavity box	$L_{min} = 431$ $B_{min} = 501$ $Hd_{min} = 117$ $Hg_{min} = 111,55$	$L = 550$ $B = 450$ $Hd = 150$ $Hg = 150$	mm
10	Ciężar skrzyni formierskiej / The weight of the cavity box	24	24	kg
11	Ciężar masy formierskiej / The weight of the sand	54	54	kg
12	Obciążenie formy / Additional strain on the form	-5	-5	kg

Tabela 4. Wyniki przeprowadzonych obliczeń układu wlewowego dla technologii nr 4
 Table 4. The results of calculations gating system for technology No. 4

Wyniki obliczeń w celu doboru układu wlewowego dla technologii nr 4 / The results of the calculations gating system for technology No. 4				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
1	Ciężar odlewu / The weight of the cast	10,20	10,20	kg
2	Czas zalewania / Pouring time	7,00	7,00	s
3	Prędkość podnoszenia metalu w formie / Velocity metal in the form	8,39	8,39	cm/s
4	Suma minimalnych przekrojów wlewów doprowadzających / The sum of the minimum cross-sections gates	4,72	4,72	cm ²
5	Przekrój wlewów doprowadzających / Gates section	0,79	1,00	cm ²
6	Przekrój belki wlewowej / Runner section	1,20	1,20	cm ²
7	Przekrój wlewu głównego / Sprue section	1,40	1,50	cm ²
8	Pojemność zbiornika wlewowego / Pouring basin capacity	526	714	cm ³
Wyniki obliczeń w celu doboru skrzynki formierskiej i pozostałych parametrów technologicznych dla technologii nr 4 / The results of the calculations to the cavity box and other technological parameters for technology No. 4				
Lp./ Ordinal number	Nazwa parametru / The name of the parameter	Wynik obliczeń / The result of the calculation	Wartość przyjęta do obliczeń / The value used in calculations	Jednostka/ Unit
9	Skrzynka formierska / Cavity box	$L_{min} = 431$ $B_{min} = 501$ $Hd_{min} = 117$ $Hg_{min} = 111,55$	$L = 550$ $B = 450$ $Hd = 150$ $Hg = 150$	mm
10	Ciężar skrzyni formierskiej / The weight of the cavity box	24	24	kg
11	Ciężar masy formierskiej / The weight of the sand	54	54	kg
12	Obciążenie formy / Additional strain on the form	-5	-5	kg

4. Poszczególne wersje technologii przygotowanych w oprogramowaniu CAD – SOLIDWORKS

Posiadając wszystkie obliczenia technologiczne, przystąpiono do projektowania układu wlewowego. Zostały przygotowane cztery wersje wykonania odlewu tarczy hamulcowej.

Celem przygotowania i wykonania symulacji numerycznych była analiza procesu wypełniania wnęki formy odwzorowującej kształt tarczy hamulcowej pod kątem uzyskania odlewu bez wad odlewniczych. Analizie poddano 4 technologie zalewania.

Poszczególne wersje przygotowanych technologii przedstawiono na rysunkach 2–5.

Przedstawiona na rysunku 2 technologia wykonania nr 1 charakteryzuje się umieszczoną belką wlewową równoległą do krótszej ściany formy oraz prostopadłą do jej dłuższej ściany. Cztery wlewy doprowadzające znajdują się prostopadłe do położenia belki wlewowej (kierunek wypełniania przez ciekły stop).

Przedstawiona na rysunku 3 technologia wykonania nr 2 odznacza się umieszczoną koncentrycznie belką wlewową względem odlewu. Na obwodzie belki wlewowej rozmieszczonych jest sześć wlewów doprowadzających.

Technologia wykonania nr 3 na rysunku 4 zawiera (podobnie jak technologia nr 2) umieszczoną koncentrycznie belką wlewową względem odlewu. Na obwodzie belki wlewowej rozmieszczonych jest sześć wlewów doprowadzających, które są styczne względem odlewu tarczy hamulcowej.

Na rysunku 5 przedstawiono technologię wykonania oznaczoną numerem 4. Zawiera ona (podobnie jak technologia nr 3) umieszczoną koncentrycznie belką wlewową względem odlewu, jednak w tym wypadku jest ona skrócona do połowy okręgu. Po obwodzie belki wlewowej rozmieszczone są cztery wlewy doprowadzające, które są styczne względem odlewu tarczy hamulcowej.

4. Technology versions prepared in CAD software – SOLIDWORKS

With all the technological calculation, was undertaken to design the gating system. Four versions cast brake disc was prepared.

The purpose of the preparation and implementation of numerical simulation analysis of casting process was just like the shape of the brake disc for getting cast without casting defects. Four pouring technologies editions were analysed.

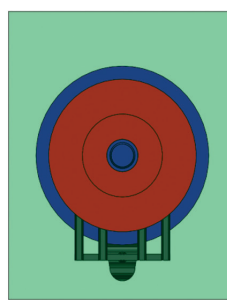
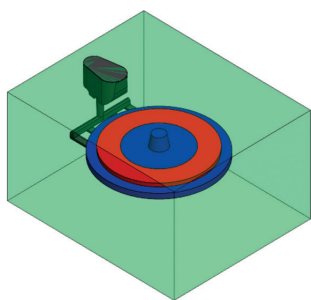
The editions prepared technologies are shown in Figures 2–5.

Presented in Figure 2 technology No. 1 is characterized by runner which is parallel to the shorter walls and perpendicular to its long walls. Four gates are perpendicular to the position of runner (direction of liquid alloy way).

Presented in Figure 3 technology No. 2 is located concentric with the runner relative to the cast. On the perimeter of the runner, spaced six gates.

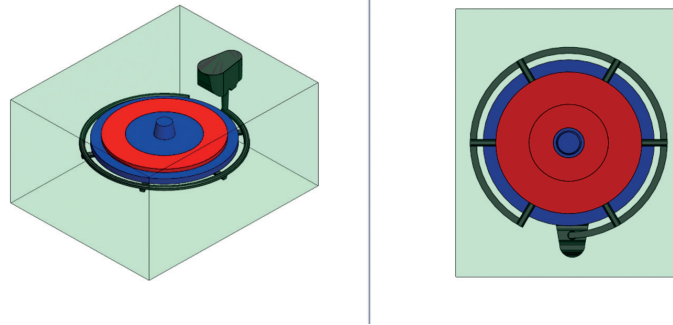
Technology No. 3 in Figure 4 contains (like technology No. 2) concentric runner relative to the cast. On the perimeter of the runner spaced six gates, which are tangent relative to cast – brake disc.

Figure 5 shows the implementation technology numbered 4. It contains (as well as technology No. 3) concentric runner relative to the cast, however, in this case, it is shortened to half of the circle. Around the perimeter of the runner are arranged four gates that are tangent relative to cast – brake disc.

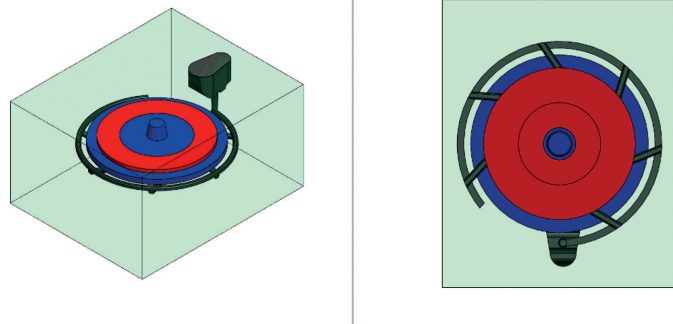


Rys. 2. Technologia nr 1

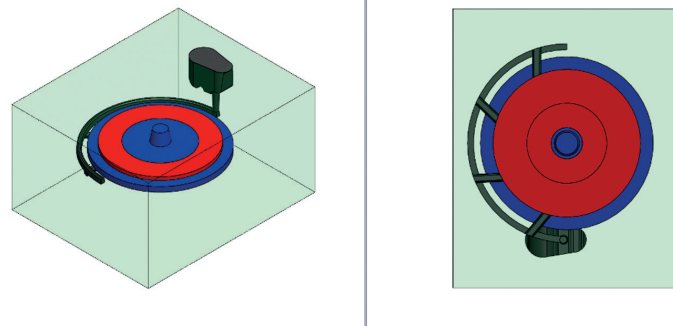
Fig. 2. Technology No. 1



Rys. 3. Technologia nr 2
Fig. 3. Technology No. 2



Rys. 4. Technologia nr 3
Fig. 4. Technology No. 3



Rys. 5. Technologia nr 4
Fig. 5. Technology No. 4

5. Wyniki oraz analiza wyników symulacji numerycznej technologii odlewniczej tarczy hamulcowej w oprogramowaniu MAGMASOFT

Przed przystąpieniem do wykonania symulacji dobrano warunki jednoznaczności. Warunki geometryczne przygotowano w programie CAD (geometria: odlewu, formy, rdzenia, układu wlewowego). Warunki fizyczne

5. Results and analysis of the numerical simulation technology of casting proces – brake disc in the MAGMASOFT software

Prior to the implementation of the simulation have been prepare boundary conditions. Geometrical conditions prepared in CAD (geometry: cast, mould, core, gating system). Physical conditions and thermophysi-

są to parametry termofizyczne dobranych materiałów, które zostały przyjęte z bazy danych programu MAGMASOFT. Warunki brzegowe to obszary znajdujące się na powierzchniach styku poszczególnych brył. Warunki początkowe to zastosowany: stop odlewniczy, materiał formy, materiał rdzenia, przyjęta temperatura zalewania, temperatura formy przed odlewaniem, temperatura rdzenia przed odlewaniem [19]. Przyjęte warunki jednoznaczności do przeprowadzonej symulacji zestawiono w tabeli 5.

cal parameters of selected materials have been adopted from the database of the MAGMASOFT software. Boundary conditions are areas located on the contact surfaces of the individual areas. The initial conditions are applied: casting alloy, mould material, core material, pouring temperature, the temperature of the mould before casting, core temperature before casting [19]. Adopted boundary conditions to carried out simulations are summarised in Table 5.

Tabela 5. Dobre warunki jednoznaczności w celu przeprowadzenia symulacji

Table 5. Selected boundary conditions to perform simulation

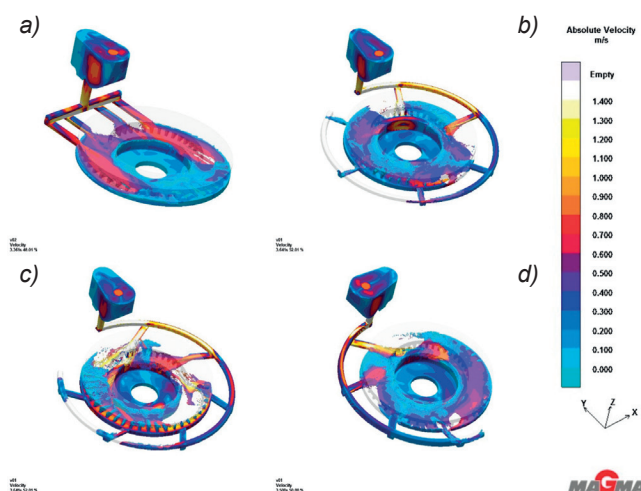
Parametr / The name of the parameter	Zastosowany materiał/wartość / Selected material/value	Jednostka/ Unit
Dobry stop / Selected alloy	EN-GJL-200	–
Dobry materiał formy / Selected mould material	Masa furanowa / Furan mould	–
Dobry materiał rdzenia / Selected core material	Masa chromitowa – technologia Cold Box / Chromite sand – Cold Box technology	–
Temperatura zalewania / Pouring temperature	1380	°C
Temperatura formy (przed odlewaniem) / Mould temperature (before casting)	20	°C
Temperatura rdzenia (przed odlewaniem) / Core temperature (before casting)	20	°C

Wyniki symulacji numerycznej dla poszczególnych technologii wykonania tarczy hamulcowej zamieszczono w podrozdziałach 5.1–5.4.

The numeric simulation results for each brake disc technology is provided in Subsections 5.1–5.4.

5.1. Prędkość przepływu ciekłego metalu podczas wypełniania formy odlewniczej

5.1. The velocity of liquid metal during filling mould



Rys. 6. Prędkość przepływu ciekłego metalu podczas wypełniania formy odlewniczej: a) technologia nr 1, b) technologia nr 2, c) technologia nr 3, d) technologia nr 4

Fig. 6. The velocity of liquid metal during filling mould: a) technology No. 1, b) technology No. 2, c) technology No. 3, d) technology No. 4

Wyniki symulacji dotyczącej prędkości przepływu ciekłego metalu podczas wypełniania formy odlewniczej przedstawione są na rysunku 6. Na podstawie wyników można przewidywać, gdzie będą występowały oberwania masy formierskiej na skutek zbyt dużej prędkości ciekłego metalu. Obszary te znajdują się w belce wlewowej oraz wlewach doprowadzających, gdzie metal zaczyna wypełniać wnękę formy odlewniczej. Wartość prędkości w tych miejscach jest największa. Ponadto można zaobserwować również zjawisko mieszania się strug ciekłego metalu podczas wypełniania wnęki formy.

Rozkład prędkości we wszystkich technologiach zalewania jest porównywalny. Technologia nr 1 (rys. 6a) odznacza się spokojnym przepływem metalu, który wypełnia wnękę formy.

W technologii nr 2 (rys. 6b) i technologii nr 3 (rys. 6c) można zaobserwować burzliwy przepływ strugi metalu wpływającego do wnęki formy. Jest to zjawisko niekorzystne, gdyż może doprowadzić do oberwań masy ze ścianek wnęki formy.

Ponadto w technologii nr 2 i 3 występuje zjawisko mieszania się strug ciekłego metalu. Ciekły stop – zanim wypełni wnękę formy – trafia do wlewów doprowadzających, które znajdują się po przeciwnej stronie. Może to doprowadzić do wczesnego zakrzepnięcia metalu w układzie wlewowym w skutek czego mogą zostać odcięte pozostałe elementy układu wlewowego. Zjawisko to może doprowadzić do powstania wad odlewów, takich jak niedolewy lub zimne krople.

Technologia nr 4 (rys. 6d) charakteryzuje się łagodnym przepływem ciekłego metalu. Belka wlewowa została zaprojektowana koncentrycznie w stosunku do odlewu oraz skrócona do połowy okręgu. Cztery wlewy doprowadzające umieszczone stycznie do odlewu zapewniają łagodny przepływ ciekłego stopu oraz w porównaniu do technologii nr 2 i 3 – nie występuje zjawisko mieszania się strug.

5.2. Rozkład temperatury ciekłego metalu podczas wypełniania formy odlewniczej

Wyniki symulacji numerycznej pozwalają oszacować rozkład temperatury ciekłego metalu podczas wypełniania formy odlewniczej (rys. 7). Temperatura solidus dla żeliwa EN-GJL-200 wynosi 1158°C, a temperatura likwidus: 1200°C. Kształtujące się pole temperatury podczas wypełniania wnęki formy pozwala ocenić, czy została poprawnie dobrana temperatura zalewania, tzn. czy ciekły metal podczas wypełniania wnęki formy nie zacznie krzepnąć, zanim całkowicie ją wypełni. Zjawisko to może powodować występowanie niedolewów w odlewie.

Technologia nr 1 (rys. 7a) charakteryzuje się spokojnym przepływem ciekłego metalu. W tej technologii nie występują duże różnice temperatury ciekłego stopu podczas wypełniania wnęki formy.

The simulation results for the velocity of liquid metal during filling mould are presented in Figure 6. This results provide, where sand erosion had as a result of too high velocity of liquid metal. These areas are located in the runner and in gates where metal begins to fill the cavity mould. Speed value in these places is the largest. Additionally, occurs the phenomenon of mixing liquid around metal when filling cavity.

Velocity distribution in all casting technologies is comparable. Technology No. 1 (Fig. 6a) is characterised by quiet flow of liquid metal which fills the mould.

In technology No. 2 (Fig. 6b) and technology No. 3 (Fig. 6c), occurs the turbulent flow of the stream metal flowing into the mould. This is the phenomenon of the negative, as it can lead to erosion sand of the walls of the mould.

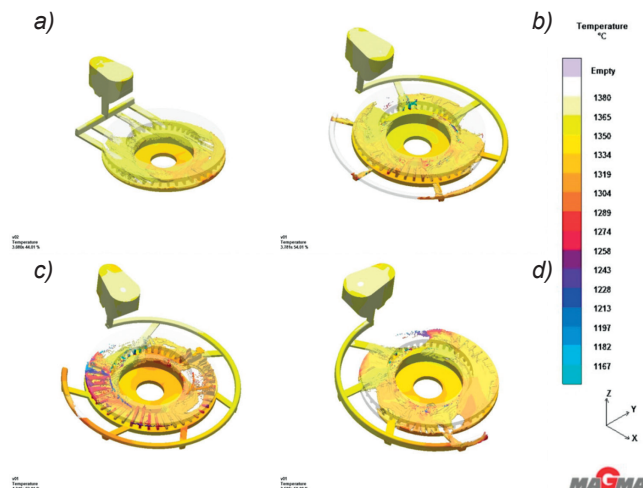
In addition, technologies No. 2 and No. 3 present the phenomenon mixing stream of liquid metal. The liquid alloy – before fills the mould cavity – goes to the gates, which are located on the opposite side. This may lead to early solidification metal in the gating system with the result that can be cut off the remaining filler components. This phenomenon can lead to defects in castings, such as gaps or cold drops.

Technology No. 4 (Fig. 6d) is characterized by a gentle flow of liquid metal. Runner is designed in concentric circles to cast and shortened to half of the circle. Four gates are placed tangentially to the cast provide gentle flow of liquid alloy and compared to technologies No. 2 and No. 3 – there is the phenomenon of mixing stream.

5.2. Temperature distribution of liquid metal during filling mould

The numeric simulation results allow to estimate/assess the temperature of liquid metal during filling mould (Fig. 7). Solidus temperature for cast iron EN-GJL-200 is 1158°C, and the temperature likwidus: 1200°C. Forming temperature field when filling in the cavity to assess whether it was properly chosen temperature flooding. Whether the liquid metal which fill the mould cavity begins to solidify, before it fills up mould cavity. This phenomenon can cause no refills in casting.

Technology No. 1 (Fig. 7a) is characterized by a calm flow of liquid metal. In this technology, there are not big differences of temperature of liquid alloy which filling cavity.



Rys. 7. Rozkład temperatury ciekłego metalu podczas wypełniania formy odlewniczej: a) technologia nr 1, b) technologia nr 2, c) technologia nr 3, d) technologia nr 4

Fig. 7. Temperature distribution of liquid metal during filling mould: a) technology No. 1, b) technology No. 2, c) technology No. 3, d) technology No. 4

Technologia nr 2 (rys. 7b) posiada nieco bardziej burzliwy przepływ w stosunku do technologii nr 1. Wpływa to na temperaturę, jednak różnice nie są na tyle duże, żeby wpływały na zbyt wczesne krzepnięcie odlewu.

Technologia nr 3 (rys. 7c) przedstawia różnicę temperatury zwłaszcza na żebrach wentylacyjnych. Jednak różnice w temperaturze nie są na tyle duże, aby doprowadziły do zbyt wczesnego zakrzepnięcia stopu wypełniającego wnękę formy.

Technologia nr 4 (rys. 7d) wykazuje mniejsze różnice w temperaturze w porównaniu do projektu nr 3. Odpowiednio skonstruowany układ wlewowy, który jest stycznie doprowadzony do odlewu, zapewnia łagodny przepływ ciekłego stopu, co powoduje mniejsze różnice w jego temperaturze. Skutkuje to ograniczeniem wad odlewniczych w postaci niedolewów lub zimnych kropeł.

5.3. Rozkład porowatości w poszczególnych technologiach

Rozkład porowatości w odlewie informuje o miejscach, w których występują puste przestrzenie osłabiające odlew (rys. 8).

W symulacji technologii nr 1 (rys. 8a) zaobserwowano porowatość na obwodzie górnej krawędzi odlewu i układzie wlewowym. Uwzględnienie naddatków spowoduje usunięcie porowatości odlewu na drodze obróbki mechanicznej.

Największa porowatość występuje w technologii nr 2 (rys. 8b). Górna część odlewu jest prawie całkowicie porowata. Jednak uwzględniony w tym miejscu nadatek rozwiąże problem, gdyż porowatość (podobnie jak w technologii nr 1) zostanie usunięta poprzez obróbkę mechaniczną.

Porowatość w technologii nr 3 (rys. 8c) występuje w małym stopniu na żebrach wentylacyjnych oraz na

Technology No. 2 (Fig. 7b) has slightly more turbulent flow in relation to the technology No. 1. This affects the temperature, however, the differences are not large enough to affect the early solidification of cast.

Technology No. 3 (Fig. 7c) shows the temperature difference especially on ribs. However, differences in temperature are not big enough to have led to the early solidification alloy than filler cavity forms.

Technology No. 4 (Fig. 7d) show smaller differences in temperature compared to the technology No. 3. Properly designed the gating system, which is tangent to the casting. It provides gentle flow of liquid, which results in smaller differences in its temperature. This results in a restriction of casting defects in the form of no refills in casting or cold drops.

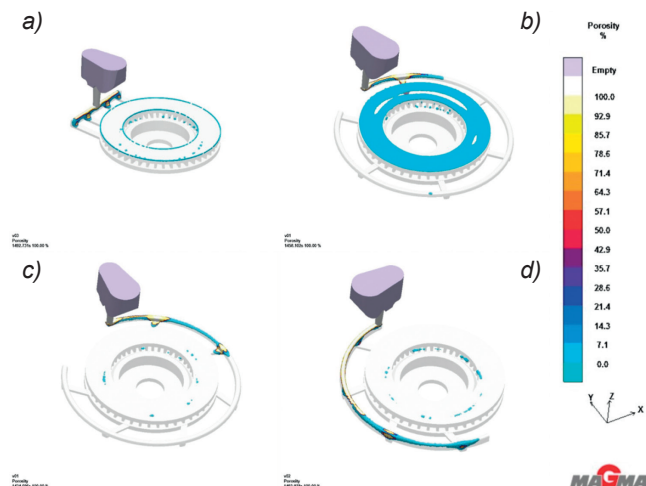
5.3. Distribution of porosity in individual technologies

Distribution of porosity in cast tells about the places where there are empty spaces reduce area in the casting (Fig. 8).

In the simulation technology No. 1 (Fig. 8a) porosity on the perimeter of the top edge of the casting and gating system. Incorporate allowances will remove the porosity of cast on by mechanical processing.

The largest porosity occurs in technology No. 2 (Fig. 8b). The top edge of the casting is almost completely porous. However, included in this site allowance will solve the problem, because porosity (as in technology No. 1) will be removed by machining.

The porosity in the technology No. 3 (Fig. 8c) occurs in a small way on the ventilation ribs and runner. Porosity in technology No. 3 is much smaller than in the technologies No. 1 and 2.



Rys. 8. Rozkład porowatości w poszczególnych projektach technologicznych: a) technologia nr 1, b) technologia nr 2, c) technologia nr 3, d) technologia nr 4

Fig. 8. Distribution of porosity in specific technological projects: a) technology No. 1, b) technology No. 2, c) technology No. 3, d) technology No. 4

belce wlewowej. Porowatość w technologii nr 3 jest znacznie mniejsza niż w technologii nr 1 i technologii nr 2.

Technologia nr 4 (rys. 8d) posiada bardzo podobne rozmieszczenie porowatości, jak w technologii nr 3. W technologii nr 4 porowatość zaobserwowano głównie w belce wlewowej.

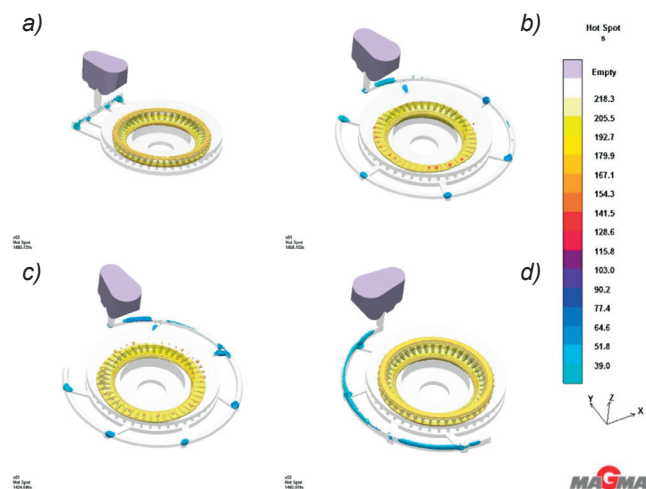
Ponadto wszystkie zaprojektowane technologie wykonania posiadają porowatość na żebrach wentylacyjnych. Jednak porowatość występująca w tych miejscach nie powinna w sposób istotny wpłynąć na późniejszą eksploatację detalu.

Technology No. 4 (Fig. 8d) has a very similar distribution of porosity, as in the technology No. 3. In the technology No. 4 porosity was observed mainly in the runner.

In addition, all related technology have porosity on ventilation ribs. However, the porosity in these places should not significantly affect subsequent part exploitation.

5.4. Węzły cieplne w poszczególnych projektach technologicznych

5.4. Hot spots in individual technological projects



Rys. 9. Węzły cieplne w poszczególnych projektach technologicznych: a) technologia nr 1, b) technologia nr 2, c) technologia nr 3, d) technologia nr 4

Fig. 9. Hot spots in individual technological projects: a) technology No. 1, b) technology No. 2, c) technology No. 3, d) technology No. 4

Węzły cieplne ulokowane są głównie na żebrach wentylacyjnych tarczy hamulcowej. Jest to zjawisko dość niebezpieczne, ponieważ może doprowadzić do dużych naprężeń w odlewie lub powstania jam skurczowych. W celu uniknięcia tego typu wad odlewniczych należy zastosować np. odpowiednie promienie zaokrągleń w celu zmniejszenia objętości węzłów cieplnych. Można również zastosować nadlewy lub ochładzalniki, tak aby lepiej zasilić odlew i zachować kierunkowe krzepnięcie.

Symulacja technologii nr 1 (rys. 9a) przedstawia węzły cieplne, które występują głównie na żebrach wentylacyjnych oraz na granicy styku belki wlewowej z wlewami doprowadzającymi.

Technologia nr 2 (rys. 9b) zawiera węzły cieplne, podobnie jak w technologii nr 1, w obszarze żeber wentylacyjnych oraz w obszarze styku belki wlewowej i wlewów doprowadzających.

Technologia nr 3 (rys. 9c) posiada węzły cieplne analogicznie jak w technologii nr 1 w obszarze żeber wentylacyjnych, belki wlewowej oraz w obszarze styku belki wlewowej i wlewów doprowadzających.

Technologia nr 4 (rys. 9d) posiada węzły cieplne przede wszystkim w obszarze żeber wentylacyjnych, pomiędzy obszarem styku belki wlewowej i wlewów doprowadzających oraz na samej belce wlewowej.

Wyniki symulacji dla wszystkich technologii w znacznym stopniu pokrywają się z obszarami występowania porowatości. Ponadto obszary tych porów wewnętrznych w znacznej mierze pokrywają się z obszarami węzłów cieplnych przedstawionych na rysunku 9.

6. Dyskusja wyników

Obliczone uzyski dla poszczególnych technologii przedstawione są w tabeli 6.

Tabela 6. Zestawienie uzysków metalu dla poszczególnych projektów

Table 6. Overview of metal yields for individual casting technologies

Technologia nr 1 / Technology No. 1	Technologia nr 2 / Technology No. 2	Technologia nr 3 / Technology No. 3	Technologia nr 4 / Technology No. 4
64%	62%	62%	64%

W technologii nr 1 układ wlewowy posiada prostą belkę wlewową oraz wlewy doprowadzające, które nie są styczne do odlewu tarczy hamulcowej. Powoduje to burzliwy przepływ ciekłego metalu, co może prowadzić do oberwań masy formierskiej we wnęce formy.

Technologia nr 2 obrazuje nieco inne doprowadzenie metalu do wnęki formy. Wlewy doprowadzające umieszczone są na obwodzie tarczy hamulcowej, lecz nie są one styczne. Powoduje to dość dużą różnicę w prędkości ciekłego metalu, którą przedstawia rysunek 6b.

W technologii nr 3 możemy zaobserwować spokojniejszy przepływ ciekłego metalu wpływającego do wnęki

Hot spots are located mainly on the ventilation ribs the brake disc. Is this phenomenon quite dangerous, because it can lead to large stresses in the casing or shrinkage cavities. In order to avoid this type of casting defects such as should be used the correct corner fillets to reduce the volume of hot spots. Also exist chance to use the feeders or chills are provided so as to better fund and keep casting directional solidification.

Simulation for technology No. 1 (Fig. 9a) thermal nodes that occur mainly on the ventilation ribs and runner contact with gates. Technology No. 2 (Fig. 9b) contains hot spots, like technology No. 1, in the area of the ventilation ribs and the runner contact with gates.

Technology No. 3 (Fig. 9c) has a hot spots as in technology No. 1 under the ventilation ribs, runner and in the contact area of runner and gates.

Technology No. 4 (Fig. 9d) has a hot spots primarily in the area of the ventilation ribs, the contact area between runner and gates of afferent and the same runner.

The simulation results for all technologies largely coincide with the areas of occurrence of porosity. In addition, areas of these pores the Interior largely coincide with the areas of heat nodes shown in Figure 9.

6. Discussion of the results

The calculated yield for each technology are presented in Table 6.

In the technology No. 1 gating system has a simple runner and gates that are not tangent to the cast of the brake disc. This results in a turbulent flow of molten metal, which can lead to erosion sand in a mould.

Technology No. 2 shows slightly different to bring metal into the mould cavity. Gates are placed at the periphery of the disc, but they are not tangent. This causes quite a large difference in velocity of liquid metal, which is illustrated in Figure 6b.

In the technology No. 3, liquid metal have calm flow when fills the mould cavity compared to the previous two technologies. In this proposal the implementation,

formy w stosunku do poprzednich dwóch technologii. W tej propozycji wykonania, podobnie jak w technologii nr 4, wlewy doprowadzające są styczne do odlewu. Odpowiednia konstrukcja wlewów doprowadzających znacznie zmniejsza burzliwy przepływ ciekłego metalu, co może skutkować ograniczeniem oberwań masy formierskiej podczas wpływu metalu do wnętrza formy.

Technologia nr 4 jest bardzo podobna do technologii nr 3. Wyniki po przeprowadzeniu symulacji numerycznej obrazują spore podobieństwo dotyczące przebiegu wypełniania wnętrza formy ciekłym metalem. W technologii nr 4 różnica w stosunku do technologii nr 3 polega na skróceniu belki wlewowej oraz zmiany liczby wlewów doprowadzających z sześciu do czterech. Różnica ta wpływa na ograniczenie kosztów wytopu związanych z ilością metalu, który należy przeznaczyć na wytop. W tabeli 7 zestawiono przybliżoną ilość metalu, którą trzeba przeznaczyć na wytop dla poszczególnych technologii.

like technology No. 4, gates are tangent to the casting. Appropriate design of the gates of afferent significantly reduces turbulent flow of liquid metal, which may result in the restriction of erosion sand when the impact of the metal to the cavity.

Technology No. 4 is very similar to the technology No. 3. The results of numerical simulation after show considerable similarity regarding the course of filling the mould cavity with liquid metal. In the proposal for the technology No. 4 the difference in relation to the technology No. 3 is to reduce runner and a change in the number of gates from six to four. This difference affects the melting costs related to the amount of metal that must be spent for melting process. Table 7 lists the approximate amount of metal that must be spent on melting process for individual technologies.

Tabela 7. Orientacyjna metalochłonność formy dla poszczególnych technologii

Table 7. Approximate absorptiveness metal of mould for individual technologies

Numer technologii / The number of technology	Orientacyjna masa metalu potrzebna na dany wytop, kg / The approximate mass of metal needed for the melting process, kg
Technologia nr 1 / Technology No. 1	15,88
Technologia nr 2 / Technology No. 2	16,34
Technologia nr 3 / Technology No. 3	16,44
Technologia nr 4 / Technology No. 4	16,27

Największy udział porowatości występuje w technologii nr 2 (rys. 8b). W pozostałych technologiach porowatości pojawiają się sporadycznie przy żebrach wentylacyjnych tarczy hamulcowej lub na obwodzie – w technologii nr 1 (rys. 8a).

The largest share of porosity occurs in the technology No. 2 (Fig. 8b). The remaining technologies porosity appear occasionally on the brake disc ribs – in the technology No. 1 (Fig. 8a).

7. Wnioski

Wykonana praca przedstawia wykorzystanie oprogramowania CAD/CAE w projektowaniu i modelowaniu procesów metalurgicznych i odlewniczych. Miała ona na celu wybranie odpowiedniej technologii odlewniczej, która umożliwi wykonanie zdrowego odlewu tarczy hamulcowej z wykorzystaniem wspomagania programem CAD – SOLIDWORKS oraz programem do symulacji procesów odlewniczych CAE – MAGMASOFT. Konstruktor, stosując tego typu programy, może znacznie przyspieszyć poszczególne etapy wpływające na wykonanie odlewu, a podjęte przez niego decyzje mogą być mniej ryzykowne np. przez przeprowadzenie symulacji numerycznej w celu wykrycia ewentualnych błędów przed wykonaniem gotowego odlewu. Wyniki

7. Conclusions

The work presented the use of CAD/CAE software in the design and metallurgical processes – modelling and casting. The aim of the work had to choose a suitable foundry technologies that will enable the implementation of a healthy cast brake disc using assist software program CAD – SOLIDWORKS and a program for simulation of casting processes CAE – MAGMASOFT. Constructor, which apply these types of programs can much faster prepare the various stages that affect performance, and taken by the it decisions may be less risky for example and carrying out numerical simulations to detect possible errors before finished cast. The numerical simulation results contained in work monitor the process of implementation of cast iron – brake disc.

symulacji numerycznej zawarte w pracy pozwalają monitorować proces wykonania odlewu żeliwnego – tarczy hamulcowej.

Wyniki obrazują, że najkorzystniejszą technologią wykonania tarczy hamulcowej będzie technologia nr 4. Związane jest to z odpowiednim projektem układu wlewowego, gdzie wlewy doprowadzające są styczne do odlewu tarczy hamulcowej i umieszczone w sposób taki, że metal podczas wypełniania wnęki formy nie posiada zbyt burzliwego przepływu. Przeprowadzone symulacje numeryczne potwierdzają zalety wybranej technologii. Porowatość, którą posiada odlew w technologii nr 4, będzie usunięta na etapie obróbki mechanicznej. Ponadto technologia wykonania nr 4 odznacza się największym uzyskiem w stosunku do technologii nr 2 i 3.

Spośród przedstawionych technologii największe podobieństwo do technologii nr 4 wykazuje technologia nr 3. Podstawową różnicą występującą w tych technologiach jest geometria układu wlewowego. Zastosowanie krótszego układu wlewowego znacząco poprawia sposób, w jaki stop wypełnia wnękę formy. Wyniki symulacji sugerują, że odlew wykonany w technologii nr 3 byłby wadliwy. Dodatkowo zastosowanie tego rozwiązania obniża koszty realizacji proponowanej technologii oraz ułatwia przygotowanie modelu odlewniczego.

Podziękowania

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

Literatura/References

1. Kaźnica N., J. Kolczyk. 2015. „Logistyka ciekłego metalu na przykładzie odlewni żeliwa”. *Logistyka* (4) : 9108–9113.
2. Sobczak J.J. (red.). 2013. *Poradnik Odlewnika. T. 1*. Kraków: Wydawnictwo Stowarzyszenia Technicznego Odlewników Polskich.
3. Fijołek A. 2015. *Zastosowanie oprogramowania symulacyjnego do opracowania technologii oraz analizy procesu zalewania i krzepnięcia tarczy hamulcowej*. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica (*praca inżynierska*).
4. Wrzesiński T. 1978. *Hamowanie pojazdów samochodowych*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
5. Khan M.A.A., A.K. Sheikh. 2016. „Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 230 (10) : 1799–1817. <https://doi.org/10.1177/0954405416640183>.
6. Gwiżdż A., M. Małyszka, M. Nowak. 2013. „Zastosowanie programu Flow-3D do symulacji procesu zalewania oraz krzepnięcia odlewów z żeliwa sferoidalnego. Cz. II / Application of the Flow-3D software for simulation of the spheroidal iron casting and solidification. Part II”. *Prace Instytutu Odlewnictwa / Transactions of the Foundry Research Institute* 53 (2) : 29–40.
7. Stachańczyk J., Z. Maniowski, S. Pysz, J. Krawczyk. 2011. „Analiza układów wlewowych i zasilających dla odlewu wpustu w wersji bez i z wykorzystaniem procesu filtracji”. *Prace Instytutu Odlewnictwa* 51 (4) : 51–63.

The results demonstrate that the most advantageous technology implementation of the brake disc will be the technology No. 4. This is connected with the appropriate gating system project, where gates are tangent to the cast iron brake disc and placed in such a way that the metal fills the mould cavity does not have too turbulent flow. Numerical simulations carried out confirms the advantages of the selected technologies. Porosity, which has cast in the technology No. 4 will be removed at the stage of mechanical processing. In addition, the technology No. 4 has the largest yield in relation to technology No. 2 and No. 3.

Out of the technologies the greatest resemblance to technology No. 4 shows the technology No. 3. The main difference in these technologies is geometry of gating system. Application of the short gating system significantly improves the way stop fills the cavity forms. Simulation results suggest that casting technology No. 3 would be faulty. In addition, this solution lowers the cost of implementing the proposed technology and makes it easier to prepare the casting pattern.

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.

8. Fijolek 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).
9. CAE. (b.d.). Pobrano z <https://mfiles.pl/pl/index.php/CAE> [dostęp: 18.07.2018].
10. Systemy CAD/CAE. (b.d.). Pobrano z <http://cadcae.tu.kielce.pl/CAE.html> [dostęp: 18.07.2018].
11. Iqbal H., A.K. Sheikh, A.K. Al-Yousef, M. Younas. 2012. „Mold Design Optimization for Sand Casting of Complex Geometries using Advance Simulation Tools”. *Materials and Manufacturing Processes* 27 (7) : 775–785.
12. *SOLIDWORKS – kompletne oprogramowanie 3D*. (b.d.). Pobrano z <https://www.solidworks.pl/> [dostęp: 16.07.2018].
13. *Startpage MAGMA Europe*. (b.d.). Pobrano z <https://www.magma-soft.de/en/> [dostęp: 16.07.2018].
14. MAGMASOFT oprogramowanie do symulacji odlewania. (b.d.). Pobrano z <https://kom-odlew.pl/produkt/magma-soft/> [dostęp: 18.07.2018].
15. Tabor A., J.S. Rączka. 1998. *Projektowanie odlewów i technologii form*. Kraków: FOTOBIT.
16. Rączka J.S. 1979. *Technologia odlewnictwa*. Kraków: Politechnika Krakowska.
17. Rączka J.S., A. Tabor, Z. Haduch. 1984. *Odlewnictwo*. Kraków: Politechnika Krakowska.
18. PN-H-54231:2000 Odlewnicze zespoły modelowe – Elementy układów wlewowych.
19. Mochnacki N., J.S. Suchy. 1995. *Numerical Methods in Computations of Foundry Processes*. Kraków: Polish Foundrymen's Technical Association.

