PRACE INSTYTUTU ODLEWNICTWA
TRANSACTIONS OF FOUNDRY RESEARCH INSTITUTE

Volume LIII Year 2013 Number 1

DOI: 10.7356/iod.2013.4

ZASTOSOWANIE PROGRAMU FLOW-3D DO SYMULACJI PROCESU ZALEWANIA ORAZ KRZEPNIĘCIA ODLEWÓW Z ŻELIWA SFEROIDALNEGO. CZ. I

USE OF FLOW-3D PROGRAM FOR SIMULATION OF POURING AND SOLIDIFICATION PROCESS OF DUCTILE CAST IRON CASTINGS. PART I

Andrzej Gwiżdż[1], Marcin Małysza[2], Mieczysław Nowak[3]

[1] Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, [2] Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, [3] Fabryka Armatur JAFAR SA, 38-207 Przysieki 87

[1] Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, [2] Foundry Research Institute, Design and Prototyping Center, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, [3] Fabryka Armatur JAFAR SA, 38-207 Przysieki 87

E-mail: andrzej.gwizdz@iod.krakow.pl

Streszczenie

Przeprowadzono analizę symulacyjną zalewania i krzepnięcia odlewów z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 zasuw miękko uszczelnionych do sieci gazowych z rur PE. Analiza ta przeprowadzona została w programie Flow-3D. Na podstawie dostarczonych przez Fabrykę Armatur JAFAR SA dokumentacji dwuwymiarowej wykonane zostały bryły przestrzenne w programie CAD, które następnie zostały poddane analizie symulacyjnej odlewania oraz krzepnięcia dla zasuw trzech wielkości DN50, DN100 i DN150. W niniejszej pracy przedstawiono analizę dotyczącą odlewów żeliwnych składających się na zasuwę wielkości DN150. Analiza objęła różne warianty technologii odlewnia i była podstawą do wyboru optymalnej technologii, na podstawie, której wykonano dokumentację konstrukcyjną płyt modelowych i modeli do wykonania prototypowych odlewów. Zastosowanie programu Flow-3D do symulacji zalewania i krzepnięcia odlewów do zasuw mniejszych DN50 zostanie przedstawione w części II.

Słowa kluczowe: komputerowe wspomaganie produkcji odlewniczej, symulacja zalewania i krzepnięcia, armatura żeliwna do instalacji przesyłowych gazu

Abstract

Pouring and solidification of EN-GJS-400-15 ductile cast iron castings of soft wedge gate valves for PE pipes used in gas pipelines was simulated. The analysis was performed in Flow-3D program. On the basis of the two-dimension documentation provided by Fabryka Armatur JAFAR SA, three-dimension solids were prepared in CAD, which were subsequently subject to simulation analysis of pouring and solidification of castings of gate valves of three sizes: DN50, DN100 and DN150. This paper presents the analysis of iron castings forming DN150 gate valve. The analysis covered different technologies of casting and was the basis for selecting the optimum casting technology, which became the basis for the preparation of design documentation of match plates and models for the performance of prototype castings. The use of Flow-3D program for the simulation of pouring and solidification process of castings for smaller DN50 gate valves will be described in part II.

Keywords: computer-aided casting manufacture, simulation of pouring and solidification, cast iron fittings for gas transmission installations

Wstęp

Po wykonaniu analizy stanu naprężeń w konstrukcjach odlewu korpusu, pokrywy i klina zasuw klinowych do gazu [1] wykonano prace dotyczące symulacji procesów odlewniczych otrzymywania odlewów z żeliwa sferoidalnego. Symulacja ta została przeprowadzona w programie Flow-3D.

Introduction

Works connected with the simulation of the pouring and solidification process of ductile cast iron castings were commenced only after the analysis of stress conditions in castings of body, cap and wedge of wedge-gate valves for gas installations had been conducted [1]. This simulation was performed in

Na podstawie dostarczonych przez firmę JAFAR SA dokumentacji wykonane zostały w programie CAD bryły przestrzenne, które następnie zostały wykorzystane w symulacji odlewania oraz krzepnięcia [2]. Komplet dokumentacji dotyczył detali:
- korpusy o prześwicie DN50, DN100 i DN150,
- pokrywy wielkości DN50, DN100 i DN150,
- klina zasuwy DN50, DN100 i DN150.

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej zalewania i krzepnięcia dla największej zasuwy DN150.

Program do analizy przepływu CFD Flow-3D (*Computational fluid dynamics*) pozwala na numeryczną analizę zjawisk towarzyszących przepływom różnych mediów, związanych z wymianą ciepła pomiędzy ciekłym stopem, a formą, zmianami prędkości, charakterem przepływu. Program ten znajduje zastosowanie w przemyśle odlewniczym ze względu na możliwość symulacji zjawisk zachodzących podczas odlewania [3]:
- do form piaskowych,
- do form metalowych,
- wysoko- i niskociśnieniowego,
- odśrodkowego,
- technikami *squeeze casting*.

Wykorzystanie wizualizacji wyników symulacji procesu odlewania pozwala na ocenę poprawności projektowanego układu wlewowego oraz zasilającego pod kątem wypełniania wnęki formy oraz procesów cieplnych zachodzących w formie [4, 5, 6].

Takie narzędzie ułatwia pracę konstruktora odlewnika tworzącego technologię odlewniczą. Możliwość weryfikacji koncepcji odlewania na etapie biura technologicznego pozwala na uniknięcie błędów, sprawdzenie poprawności założeń oraz wprowadzanie na bieżąco zmian, tworząc optymalną technologię docelową. Wykorzystanie wspomagania komputerowego CAD/CAE (*Computer Aided Design / Computer Aided Engineering*) pozwala na osiągnięcie zadowalających rezultatów w szybkim czasie. Wirtualizacja konstrukcji oraz procesu technologicznego umożliwia uniknięcie konieczności wykonywania kosztownych prób, wykonywania odlewów oraz oprzyrządowania prototypowego, które mają być jedynie etapem na drodze otrzymania ostatecznego detalu. Wynikiem tego jest obniżenie kosztów dzięki przeniesieniu fazy prób i błędów do przestrzeni wirtualnej, a wykonanie optymalizacji pozwala na uzyskanie lepszych produktów.

Wykonanie analizy numerycznej procesu odlewania i krzepnięcia zasuwy DN150

W artykule przedstawione zostały zestawy odlewów korpusów, klinów i pokryw. Przygotowanie symulacji komputerowej dla wybranej grupy detali poprzedzone jest stworzeniem wirtualnego odniesienia rzeczywistego detalu, zapisanie go w odpo-

Flow-3D software. On the basis of the documentation provided by Fabryka Armatur JAFAR SA, three-dimension solids were prepared in CAD, which were then used in the simulation of the pouring and solidification process [2]. The set of documentation refers to:
- body with bore diameter DN50, DN100 and DN150,
- cap in the following sizes: DN50, DN100 and DN150,
- wedge of gate valves DN50, DN100 and DN150.

This publication presents results of the simulation analysis of pouring and solidification of the biggest gate valve DN150.

Flow-3D flow analysis software for CFD (Computational fluid dynamics) allows for the numerical analysis of phenomena accompanying the flow of various liquids, which are connected with heat exchange between liquid alloy and mold, speed shift and flow pattern. This software is used in the foundry industry due to its useful function to simulate phenomena occurring while pouring [3]:
- to sand molds,
- to metal molds,
- high and low pressure,
- centrifugal,
- using squeeze casting techniques.

The use of the visualization of the pouring process simulation results allows us to assess the accuracy of the designed gating and feeding system in respect to the filling of mold cavity and thermal processes taking place in the mold [4, 5, 6].

Such a tool simplifies the work of every constructor-founder developing casting technology. The possibility to verify the casting concept on the level of technology office allows us to avoid errors, control the accuracy of our assumptions and introduce changes on a current basis, while creating the optimal target technology. The use of Computer Aided Design/Computer Aided Engineering (CAD/CAE) makes it possible to achieve satisfactory results in a short time. The virtualization of structures and technological processes allows us to avoid expensive testing, preparation of castings and prototype equipment, which should only be a step towards obtaining the final piece. As a result, costs are reduced due to the transfer of the trial and error phase to the virtual environment, while the optimization results in obtaining better products.

Performance of the numerical analysis of the pouring and solidification process of DN150 gate valve

This article presents sets of castings of bodies, wedges and caps. Computer simulation for the selected group of actual pieces is preceded by the creation of virtual references to the actual pieces,

wiednim formacie oraz wczytanie do programu symulacyjnego. W programie symulacyjnym przygotowana zostaje przestrzeń robocza dla symulacji zawierająca domenę obliczeniową, zapisane warunki brzegowe, geometrię bryły, warunki początkowe oraz dane materiałowe.

Symulacja procesu odlewania wymaga wprowadzenia bryły 3D, która uwzględnia naddatki, pochylenia, zaokrąglenia oraz promienie odlewnicze.

W celu zaprojektowania optymalnego układu wlewowego można oprzeć się na kilku zasadach technologicznych, takich jak: założenie optymalnego czasu zalewania, określenie liniowej prędkości podnoszenia się ciekłego metalu w formie, obliczenie przekroju układu wlewowego [7]. Projektowanie technologii odlewów z żeliwa sferoidalnego wymaga zaprojektowania dodatkowo układu zasilającego. Wynika to z natury krzepnięcia i zmian objętości żeliwa sferoidalnego od momentu odlania stopu do formy, aż do całkowitego zakrzepnięcia. Odpowiednie zaprojektowanie zasilacza zapewniającego dostarczenie ciekłego metalu do wybranego obszaru może być bardzo ważne na drodze do otrzymania dobrego odlewu. Bardzo pomocne jest odpowiednie określenie modułu odlewu. Modułem nazywany jest stosunek objętości do powierzchni odprowadzającej ciepło [8].

Program symulacyjny pomaga w przybliżeniu określić obszary, które krzepną, jako ostatnie, a tym samym mogą wymagać ciągłego zasilania ciekłym metalem.

Zasuwa DN150

Na rysunku 1 przedstawiono bryły 3D wykorzystane w symulacji: korpus, pokrywa, klin.

Dla przedstawionego na rysunku 2 złożenia, została przeprowadzona wstępna analiza procesu krzepnięcia. Jako materiał formy została wybrana z bazy danych programu masa bentonitowa formowana przez prasowanie, materiał odlewu żeliwo EN-GJS-400-15, T_{zal} = 1370°C. Przeprowadzona wstępna symulacja pozwala na zidentyfikowanie krzepnięcia w odlewie oraz wyznaczenie obszarów krzepnących jako ostatnie. W tych miejscach będzie można spodziewać się porowatości skurczowej. Warunki symulacji zostały założone, jako idealne, czyli warunek początkowy określił równą temperaturę w całej objętości odlewu. Nie jest to zgodne z rzeczywistością i ma na celu jedynie określenie sposobu krzepnięcia odlewu.

Wyniki symulacji zostały przedstawione na rysunku 3.

Obszary, w których mogą powstać porowatości zostały przedstawione na rysunku 4.

Następnie została przygotowana koncepcja ułożenia detalu na zarysie płyty podmodelowej wykorzystywanej w linii do automatycznego formowania,

saving them in a proper format and entering into simulation software. Simulation software prepares workspace for the simulation, consisting of the calculation domain, saved boundary conditions, geometry of solids, initial conditions and data concerning material.

For the simulation of the pouring process, we must enter 3D solid into the software, specifying surplus, inclination, curves and molding radius.

To design the optimized gating system we can rely on several technological principles, such as establishment of the optimum pouring time, determination of the linear speed for the rising of liquid metal in the mold, calculation of the cross-section of the gating system [7]. The development of the casting technology for ductile cast iron castings requires the design of an additional feeding system. This results from the nature of solidification and change in the density of ductile cast iron from the moment of pouring of the alloy to the mold until its complete solidification. The proper design of the feeder that feeds liquid metal to the selected area is a very important element in the process of obtaining good castings. It will be very helpful to properly determine casting modulus – the ratio of casting volume to the area of heat extraction surface [8].

Simulation software helps to approximately determine areas which solidify last and therefore might require constant feeding of liquid metal.

Gate valve DN150

Figure 1 shows 3D solids used in the simulation: body, cap and wedge.

The preliminary analysis of the solidification process was conducted for the compound shown in Fig. 2. Pressed betonite was selected from the database program as the material for the mold, and cast iron EN-GJS-400-15, T_{zal} = 1370°C as the material of the casting. The conducted preliminary simulation allows us to determine the solidification of the casting and indicate the areas that solidify last. In those areas, we can expect shrinkage porosity. We assumed perfect conditions for the simulation; therefore, the initial conditions determined equal temperature for the whole volume of the casting. It does not reflect the reality, because the purpose is only to determine the casting solidification pattern.

Figure 3 shows the results of the simulation.

Figure 4 shows the areas in which we can expect shrinkage porosity.

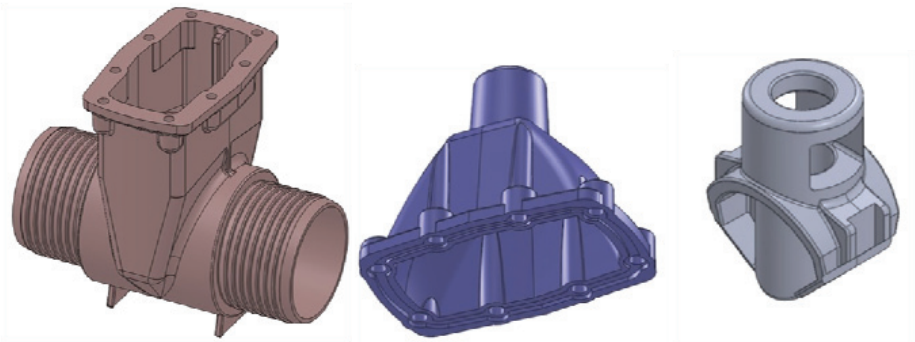
Subsequently we prepared the concept of placing the piece on the outline of molding boards used on the line for automatic molding in JAFAR SA Company. Dimensions of the package: 710 x 610 cm and symmetrically regulated height from 360 to 500 mm.

pracującej w firmie JAFAR SA. Wymiary pakietu 710 x 610 mm z regulowaną symetrycznie wysokością od 360 do 500 mm. Wymagania technologiczne płyty wymuszają zapewnienia odpowiednich odległości od krawędzi pakietu, tj. wysokości oraz usytuowania układu wlewowego.

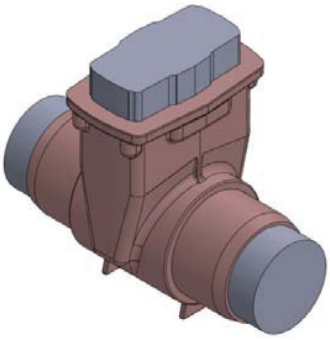
Ze względu na ograniczoną powierzchnię, na płycie umieszczony został jeden detal. Poniżej został przedstawiony sposób obliczania przekrojów układu wlewowego. Na podstawie dokumentacji została określona masa odlewu, podstawowe wymiary oraz moduł w wyznaczonym obszarze odlewu. Masa odlewu około 25 kg.

Technological characteristics of boards must ensure the proper distance from the edge of the package – its highest point and the position of the gating system.

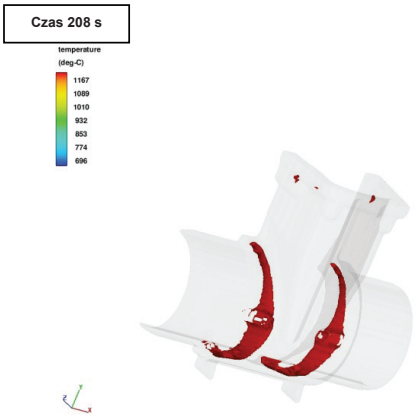
Due to the limited area, only one piece was placed on the board. Below we present the method for calculating the cross-section of the gating system. The weight of the casting, its basic dimensions and modulus in the designated area of the casting were specified on the basis of the received documentation. The casting weight amounts to ca. 25 kg.



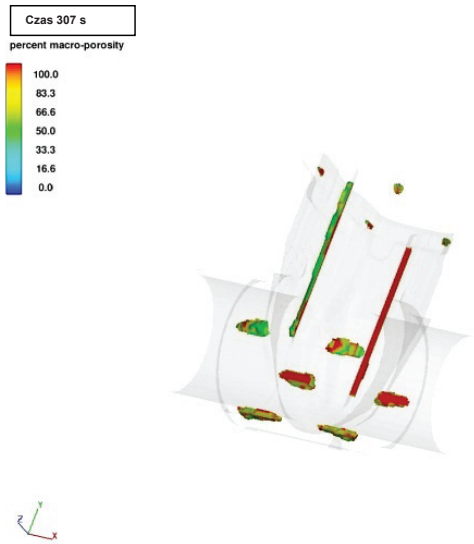
Rys. 1. Bryły 3D wykorzystane w symulacji: korpus, pokrywa, klin
Fig. 1. 3D solids used in the simulation: body, cap and wedge



Rys. 2. Bryła 3D złożenia odlewu korpusu DN150 z rdzeniem
Fig. 2. 3D solid of the compound of DN150 body and core



Rys. 3. Obszary w odlewie korpusu krzepnące jako ostatnie
Fig. 3. The areas of the casting that solidify last



Rys. 4. Porowatość przewidywana w odlewie korpusu
Fig. 4. Porosity expected in the casting of the body

Wyznaczano moduł oraz wymiary układu zasilającego [7].

$$M = \frac{V}{F_S} \tag{1}$$

gdzie:
M – moduł obszaru, cm,
V – objętość obszaru, cm^3,
Fs – powierzchnia odprowadzania ciepła, cm^2.

Projekt zasilacza został wykonany w oparciu o model Heinego (zasilacz butelkowy)

$$D = 4 \cdot M + d \tag{2}$$

gdzie:
D – średnica dolna, cm,
d – średnica górna, cm.

Średnica górna dobierana jest w zależności od wysokości oraz ilości ciekłego metalu potrzebnego do efektywnego zasilania.

Optymalny czas zalewania [3]:

$$\tau = s_1 \sqrt[3]{g \cdot Q_c} \tag{3}$$

gdzie:
s_1 – współczynnik zależny od rodzaju metalu (dla żeliwa 1,9–2,3),
Q_c – masa odlewu wraz z układem wlewowym i zasilającym, kg,
τ – optymalny czas odlewania, s.

Prędkość liniowa podnoszenia się ciekłego metalu w formie:

$$v = \frac{C}{\tau} \tag{4}$$

gdzie:
v – liniowa prędkość podnoszenia się ciekłego metalu w formie, cm/s,
C – wysokość odlewu w położeniu do zalewania, cm.

Modulus and dimensions of the feeding system were determined as presented below [7].

$$M = \frac{V}{F_S} \tag{1}$$

where:
M – modulus of the area, cm,
V – volume of the area, cm^3,
Fs – heat extraction surface, cm^2.

The design of the feeder was prepared on the basis of Hein's model (bottle feeder).

$$D = 4 \cdot M + d \tag{2}$$

where:
D – bottom diameter, cm,
d – upper diameter, cm.

The upper diameter is selected according to the height and the amount of liquid metal necessary for effective feeding.

Optimum pouring time [3]:

$$\tau = s_1 \sqrt[3]{g \cdot Q_c} \tag{3}$$

where:
s_1 – coefficient depending on the type of metal (for cast iron 1.9–2.3),
Q_c – casting weight together with the gating and feeding system, kg,
τ – optimum pouring time, s.

Linear velocity of liquid metal rising in the mold:

$$v = \frac{C}{\tau} \tag{4}$$

where:
v – linear velocity of liquid metal rising in the mold, cm/s,
C – casting height in the pouring position, cm.

Istnieją przesłanki dotyczące minimalnej prędkości podnoszenia się metalu we wnęce formy w zależności od grubości ścianki. Jeżeli wartość wyznaczona analitycznie jest mniejsza niż wartości podane w tabeli 1, należy zmienić położenie modelu w formie.

There are indications that minimum velocities of metal rising in the mold cavity depend on the thickness of cavity walls. If the analytically determined value is lower than the value given in Table 1, the position of the model in the mold must be changed.

Tabela 1. Dopuszczalne prędkości podnoszenia się metalu w formie w zależności od grubości ścianki odlewu [7]

Table 1. Allowable velocity of metal rising in the mold depending on the thickness of casting walls [7]

Grubość ścianek odlewu, mm Thickness of casting walls, mm	**Prędkość dopuszczalna *v*, cm/s Allowable velocity *v*, cm/s**	
	odlewy z żeliwa cast iron castings	**odlewy ze staliwa steel castings**
do 4 / up to 4	3–10	-
4–10	2–3	2
10–40	1–3	1
powyżej 40 / over 40	0,8–1,0	0,8

Obliczanie przekroju wlewu doprowadzającego:

$$F_{min} = \frac{Q_c}{0{,}31 \cdot \mu \sqrt{h_{śr} \cdot \tau}} \quad (5)$$

gdzie:

F_{min} – minimalny przekrój układu wlewowego w miejscu limitującym ilość przepływającego metalu, cm^2,

Q_c – masa odlewu wraz z układem wlewowym i zasilającym, kg,

μ – ogólny współczynnik oporu formy (tabela 2),

τ – optymalny czas odlewania, s,

$h_{śr}$ – średnie ciśnienie ferrostatyczne, cm.

Wyznaczanie stosunku powierzchni przekroju poszczególnych elementów układu wlewowego zależy od odlewanego metalu. Wielkości charakterystyczne dla żeliwa wynoszą:

– powierzchnia przekroju wlewu doprowadzającego – F_{WD} = 1 cm^2,
– powierzchnia przekroju wlewu rozprowadzającego – F_{WR} = 1,2–2,0 cm^2,
– powierzchnia przekroju wlewu głównego – F_{WG} = 1–1,5 cm^2.

Calculation of the in-gate cross-section:

$$F_{min} = \frac{Q_c}{0{,}31 \cdot \mu \sqrt{h_{śr} \cdot \tau}} \quad (5)$$

where:

F_{min} – minimum cross-section of the gating system in the point limiting the flow of liquid metal, cm^2,

Q_c – casting weight together with the gating and feeding system, kg,

μ – general mold friction coefficient (Table 2),

τ – optimum pouring time, s,

$h_{śr}$ – average ferrostatic pressure, cm.

The determination of the ratio of the area of cross-sections of the individual gating system components depends on the metal type. Below we present characteristic values for cast iron:

– the area of in-gate cross-section – F_{IG} = 1 cm^2,
– the area of cross-gate cross-section – F_{CG} = 1.2–2.0 cm^2,
– the area of pouring-gate cross-section – F_{PG} = 1–1.5 cm^2.

Tabela 2. Współczynniki oporu formy dla odlewów z żeliwa i ze staliwa wykonanych w formach suszonych i wilgotnych [7]

Table 2. Friction coefficient of molds for cast iron and steel castings cast in dry and wet molds [7]

Rodzaj odlewów Casting type	**Rodzaj formy Mold type**	**Opór formy Mold friction**		
		duży/high	**średni/medium**	**mały/small**
		współczynnik oporu formy *μ* / mold friction coefficient *μ*		
Odlewy z żeliwa Cast iron castings	wilgotna/wet	0,35	0,42	0,50
	suszona/dry	0,41	0,48	0,60
Odlewy ze staliwa Steel castings	wilgotna/wet	0,25	0,32	0,42
	suszona/dry	0,30	0,38	0,50

Wyznaczanie średniego ciśnienia ferrostatycznego:

$$h_{śr} = K - \frac{P^2}{C} \quad (6)$$

gdzie:
$h_{śr}$ – średnie ciśnienie ferrostatyczne, cm,
K – początkowe maksymalne ciśnienie ferrostatyczne, cm,
P – wysokość odlewu nad poziomem wlewów doprowadzających, cm.

Powyżej przedstawiona metodyka została wykorzystana do wyznaczenia podstawowych wielkości związanych z układem wlewowym.

Determination of average ferrostatic pressure:

$$h_{śr} = K - \frac{P^2}{C} \quad (6)$$

where:
$h_{śr}$ – average ferrostatic pressure, cm,
K – initial maximum ferrostatic pressure, cm,
P – casting height over the level of in-gates, cm.

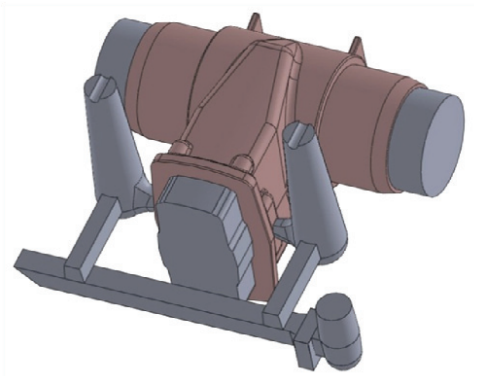
The methodology presented above was used to determine basic values referring to the gating system.

Technologiczna koncepcja odlewania korpusu

Na podstawie wyżej przedstawionego sposobu, przygotowana została koncepcja technologii odlewania korpusu. Trójwymiarowa geometria modeli CAD odlewu oraz układu wlewowo-zasilającego została wykorzystana do wykonania symulacji odlewania oraz krzepnięcia.

Technological concept of body casting

On the basis of the method presented above, we prepared the technological concept of body casting. Three-dimensional geometry of CAD models of the casting and the gating-feeding system were used to conduct the simulation of the pouring and solidification process.



Rys. 5. Koncepcja I technologii odlewania korpusu
Fig. 5. The concept of I technology of body casting

W symulacji został uwzględniony rdzeń oraz filtr 50 x 50 x 20, 10 ppi. Koncepcja zakładała wykorzystanie dwóch zasilaczy, których zadaniem jest przeniesienie powstających porowatości do ich środka. Wykorzystano zasilacze butelkowe (Heinego). Dany kształt zapewnia dostarczenie ciekłego metalu przez wytworzenie wewnątrz osi zasilacza kanału rozciągającego się od jego górnej części, zapewniającego szeroki zakres temperatury metalu w stanie ciekłym [8]. Wizualizacja danych uzyskanych z symulacji została przedstawiona na rysunku 6.

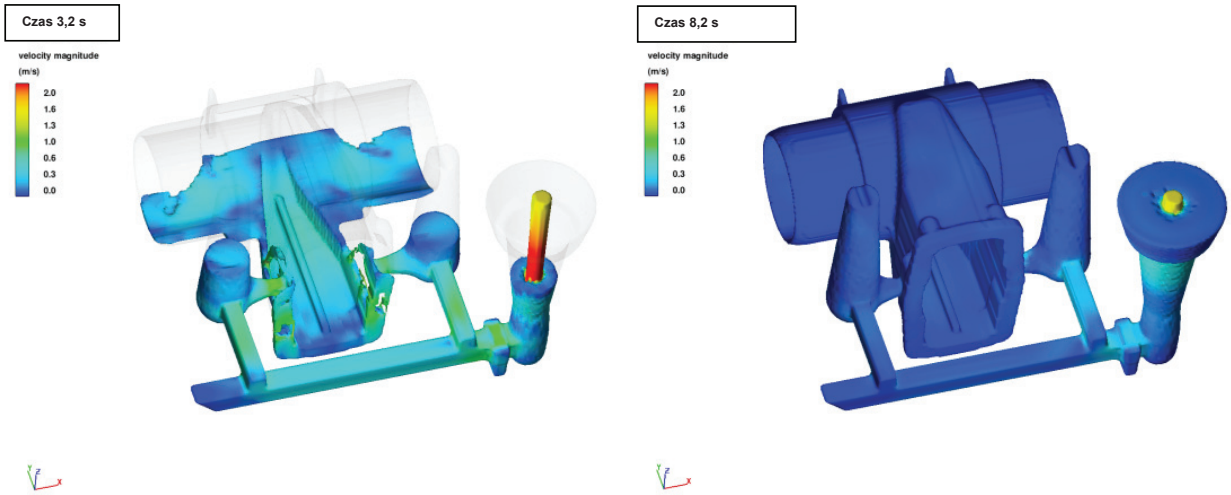
Analiza symulacyjna pozwala na ocenę poprawności projektowanego układu wlewowego pod kątem sprawności oraz spełnienia podstawowych funkcji, tj. wprowadzenie ciekłego metalu z odpowiednią prędkością, utrudnienie przepływu zanieczyszczeń. W analizowanym przypadku struga ciekłego metalu osiąga

The simulation took into account the core and filter 50 x 50 x 20, 10 ppi. The concept involved the use of two feeders that would shift the resulting porosity to the center. Bottle feeders (Hein's) were used. Their shape ensures feeding of liquid metal by creating, in the internal axis of the feeder, a channel extending from the upper part of the feeder, which provides a wide range of liquid metal temperature [8]. Figure 6 shows the visualization of data obtained during the simulation.

The simulation analysis allows us to assess the accuracy of the design of the gating system in terms of efficiency and fulfillment of basic functions, that is, feeding liquid metal at the proper velocity and hindering the flow of contaminants. In the analyzed case, the velocity of the jet of liquid metal reaches 1 m/s when flowing into mold cavity, which is an admis-

prędkość około 1 m/s wpływając do wnęki formy, co jest dopuszczalną wartością. Zbyt duża prędkość mogłaby powodować nadmierne wypłukiwanie masy formierskiej lub rdzeniowej i wprowadzać ją do odlewu, a zbyt mała prędkość mogłaby prowadzić do niedolewów. Całkowity czas odlewania wyniósł t = 6 s. Dodatkowymi możliwościami analizy symulacyjnej jest ocena, jak ciekły metal wypełnia formę oraz które obszary zostały wypełnione jako pierwsze.

sible value. Too high velocity could cause the removal of molding or core compound and feeding it into the casting, while too small velocity could result in misrun. Total pouring time was t = 6 s. Moreover, the simulation analysis allows us to assess how the liquid metal fills the mold and which areas are filled first.



Rys. 6. Symulacja procesu wypełniania wnęki formy korpusu

Fig. 6. The simulation of the body mold filling process

Wizualizacja procesu wypełniania wnęki formy korpusu pozwala określić, do których obszarów odlewu ciekły metal przebył najdłuższą drogę. Taka ocena pozwala stwierdzić, które obszary są narażone na obecność najchłodniejszego metalu. Najbardziej oddalonymi elementami korpusu są króćce. Droga przebyta przez metal w ten obszar wynosi około 1,5 m. Kryterium oceny przepływu może być również ilość powietrza zamykanego podczas przepływu oraz tworzenie się zaburzeń powierzchni swobodnej. Program oblicza koncentrację tlenków w oparciu o czas kontaktu metalu z atmosferą. Takie defekty mogą koncentrować się w wybranych obszarach odlewu oraz powodować wady powierzchniowe. Wyniki analizy zostały przedstawione na rysunku 7.

Ocena ilości powietrza zamkniętego przez przepływający ciekły metal pozwala w przybliżeniu określić obszary, gdzie może wystąpić koncentracja tlenków tworzących się na powierzchni.

Krzepnięcie ciekłego metalu w formie, zmiana stanu skupienia, wydzielanie się faz, przemiany w stanie ciekłym i stałym są czynnikami mającymi duży wpływ, na jakość odlewu. Ocena charakteru krzepnięcia, tzn. czy jest objętościowe, czy kierunkowe, pozwala we wczesnym etapie projektowania technologii uzyskać pożądany efekt. Kierunkowe krzepnięcie zapewnia zmianę stanu skupienia odpo-

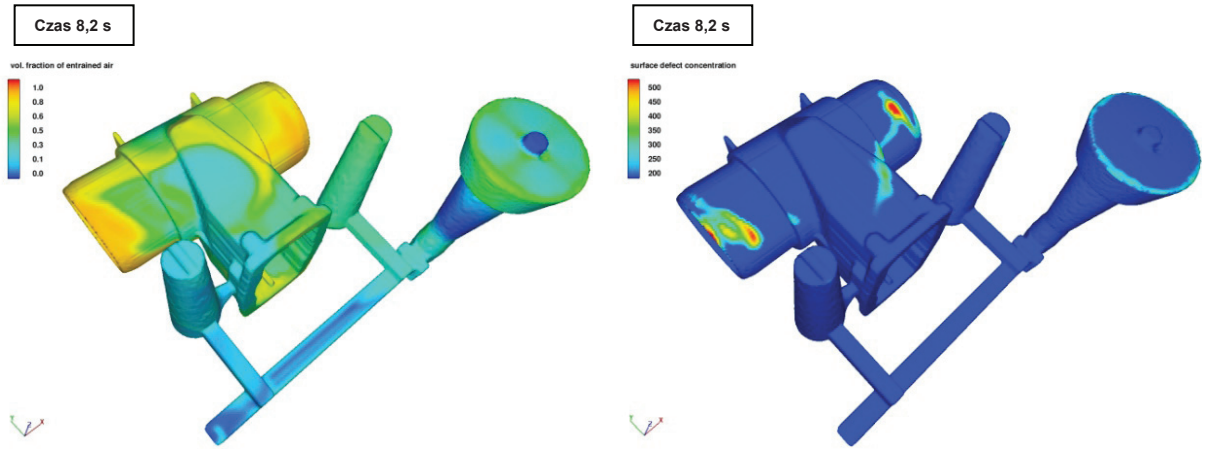
The visualization of the filling of the body mold cavity makes it possible to determine to which areas of the casting liquid metal traveled the longest way. Such assessment allows us to state which areas are vulnerable to the presence of the coldest metal. The most distant parts of the body are connectors. The distance traveled by the metal to this area amounts to ca. 1.5 m. The amount of air entrapped during the flow and the creation of defects to free surface can also constitute flow assessment criteria. Software calculates the concentration of oxides on the basis of the contact time of metal with the atmosphere. Such defects can concentrate in selected areas of the casting and cause surface defects. The analysis results are shown in Figure 7.

The assessment of the amount of air entrapped in the flowing liquid metal allows us to determine the approximate area where oxides can concentrate on the surface.

The solidification of liquid metal in the mold, change of the state, phase precipitation, transformations in liquid and solid state constitute factors that greatly influence the quality of castings. The evaluation of the solidification pattern, that is, whether it is equiaxed or directional, allows us to reach the desired effect in the early stage of the development of technology. Directional solidification ensures the change

wiednio w kierunku od chłodniejszej części, np. ścianki przez kolejne warstwy do środka odlewu. Natomiast krzepnięcie objętościowe charakteryzuje się nierównowagową zmianą stanu skupienia, co może powodować duże rozdzielanie się stref krzepnących, czego efektem mogą być porowatości rozproszone. Poza wpływem technologii odlewniczej na charakter krzepnięcia wpływa również gatunek stopu, co jest związane z morfologią krystalizacji [9]. Na rysunku 8 zostało przedstawione krzepnięcie analizowanego detalu.

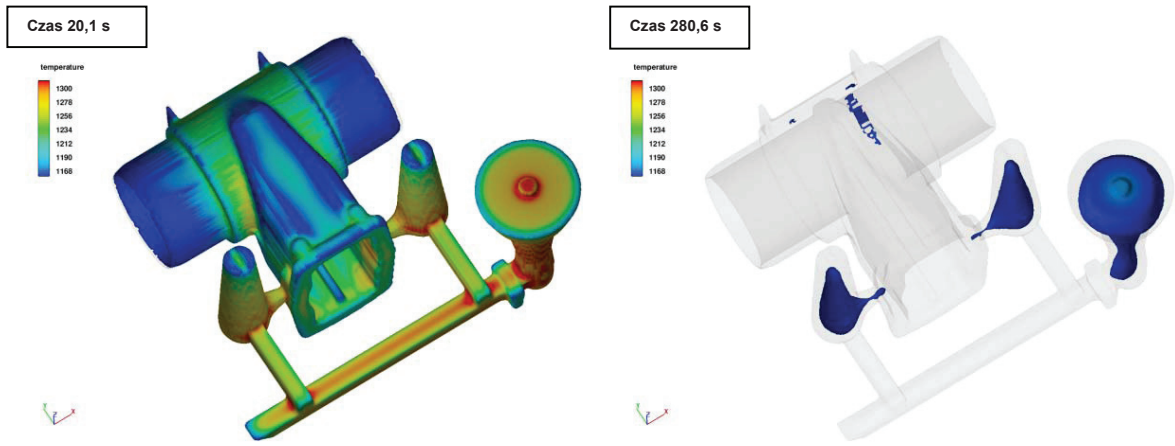
of the state in the direction beginning from the colder part, e.g. walls, through next layers to the center of casting. While equiaxed solidification characterizes with nonequilibrium change of the state, which can cause the separation of solidification zones, resulting in dispersed porosity. It is not only the foundry technology that influences the solidification pattern, but also the class, which is connected with crystal morphology [9]. Figure 8 shows the solidification of the analyzed piece.



a) b)

Rys. 7. Wizualizacja procesu wypełniania wnęki formy korpusu: a) powierzchnia kontaktu ciekłego metalu z powietrzem, możliwość powstania tlenków na jej powierzchni; b) koncentracja zaburzenia powierzchni swobodnej

Fig. 7. The visualization of the filling of body mold cavity: a) contact surface of liquid metal with the air, possibility of oxides on the surface; b) free surface defect concentration



a) b)

Rys. 8. Symulacja krzepnięcia ciekłego metalu w odlewie

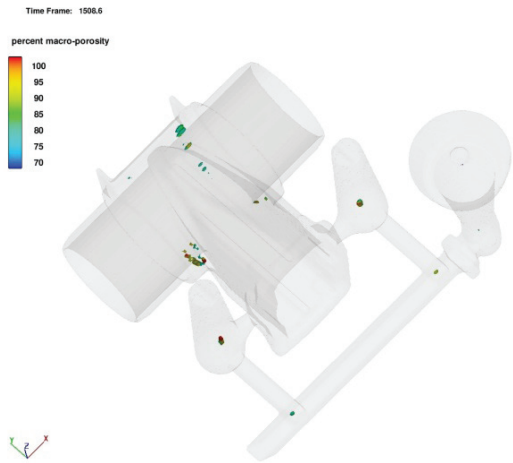
Fig. 8. The simulation of solidification of liquid metal in the casting

Wyniki pozwalają ocenić, że w ściance elementu o zmiennej grubości powstał węzeł cieplny, który krzepnie po odłączeniu od zasilania zapewnionego przez zasilacze. W tych obszarach mogą powstawać porowatości. Na rysunku 9 przedstawione zostały porowatości w odlewie.

Wady koncentrują się w obszarze króćca łączącego oraz w tylnej części walcowej korpusu.

The results allow us to evaluate that the heat center was created in the wall of the piece of variable thickness and it solidifies when the feeding stops. In those areas porosity can occur. Figure 9 shows porosity in the casting.

The defects concentrate in the area of the connector and in the rear cylindrical part of the body.

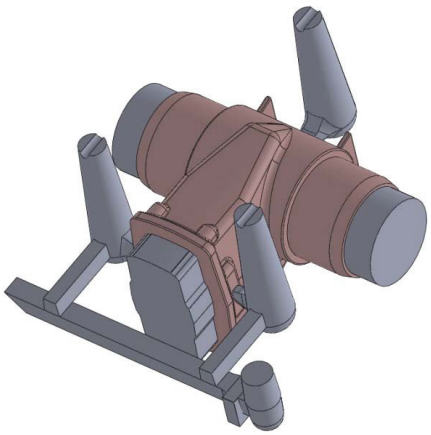


Rys. 9. Prognozowana porowatość w odlewie korpusu

Fig. 9. Projected porosity in the casting

Opracowano drugą koncepcję odlewania korpusu, w której zastosowano dodatkowy zasilacz dołączony do tylnej ścianki. Ma to na celu stworzenie dodatkowej strefy grzania oraz zapewnienie ciągłego zasilania. Cienkie ścianki króćców zaworu zakrzepną szybko, prowadząc front krystalizacji w głąb odlewu. Węzeł cieplny wytworzony przez zasilacz spowoduje doprowadzenie nowej porcji ciekłego metalu w obszary, gdzie zasilenie jest wymagane. Geometria korpusu z układem wlewowo-zasilającym została przedstawiona na rysunku 10.

Another concept of body casting was developed, in which an additional feeder attached to the rear wall was used. This solution created additional heating zone and continuous feeding. Thin walls of gate valve connectors will solidify faster, leading the solidification front into the center of the casting. The heat center created by the feeder will cause the flow of fresh, liquid metal into areas, where feeding is needed. Figure 10 shows the body geometry with the gating-feeding system.

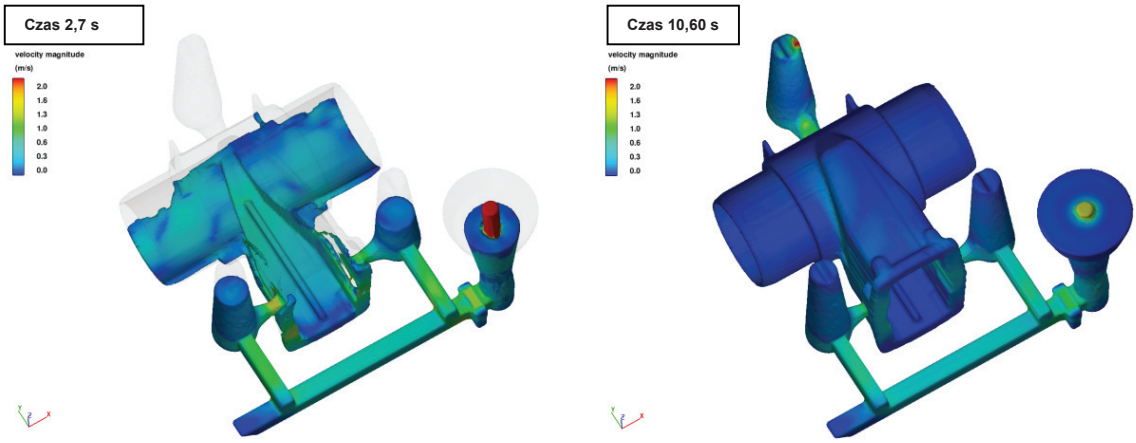


Rys. 10. Koncepcja II technologii odlewania korpusu

Fig. 10. The concept of II technology of body casting

Symulacja procesu wypełniania wnęki formy została przedstawiona na rysunku 12. Całkowity czas odlewania wyniósł t = 7 s.

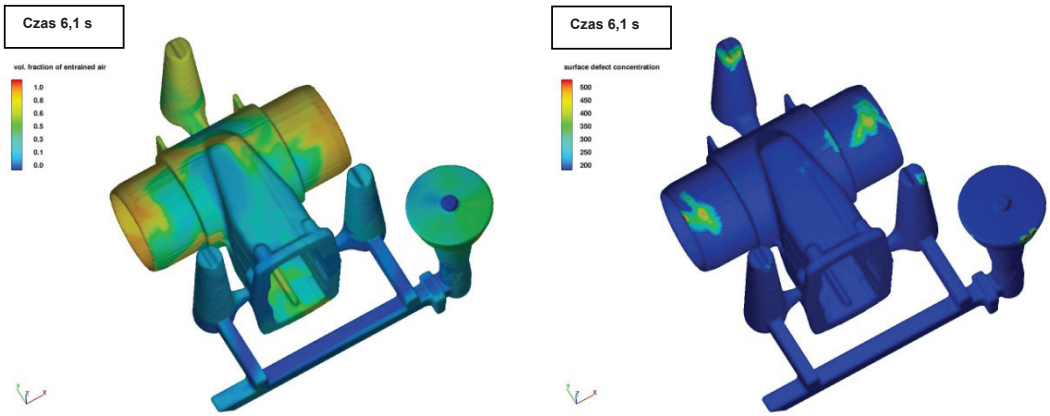
Figure 12 shows the simulation of the filling of mold cavity. Total pouring time t = 7 s.



a) b)

Rys. 11. Symulacja wypełniania wnęki formy

Fig. 11. The simulation of the filling of mold cavity



a) b)

Rys. 12. Wizualizacja procesu wypełniania wnęki formy korpusu: a) powierzchnia kontaktu ciekłego metalu z powietrzem, możliwość powstania tlenków na jej powierzchni; b) koncentracja zaburzenia powierzchni swobodnej

Fig. 12. The visualization of the filling of body mold cavity: a) contact surface of liquid metal with the air, possibility of oxides on the surface; b) free surface defect concentration

Prędkości ciekłego metalu występujące we wlewach doprowadzających są na poziomie v = 1 m/s. Jest to prędkość dopuszczalna, która zapewnia spokojne wypełnianie wnęki formy, pozwalająca na uniknięcie zamykania powietrza w ciekłym metalu. Droga, jaką przebył metal, wynosi około 1,8 m.

Porównując powyższe wyniki z wynikami z rysunku 7 (technologia I) można zauważyć, że część zanieczyszczonego ciekłego metalu została

Velocities of liquid metal that occur in in-gates oscillate around v = 1 m/s. It is an acceptable velocity that provides steady filling of the mold cavity, preventing from entrapping the air in liquid metal. The distance traveled by metal amounts to ca. 1.8 m.

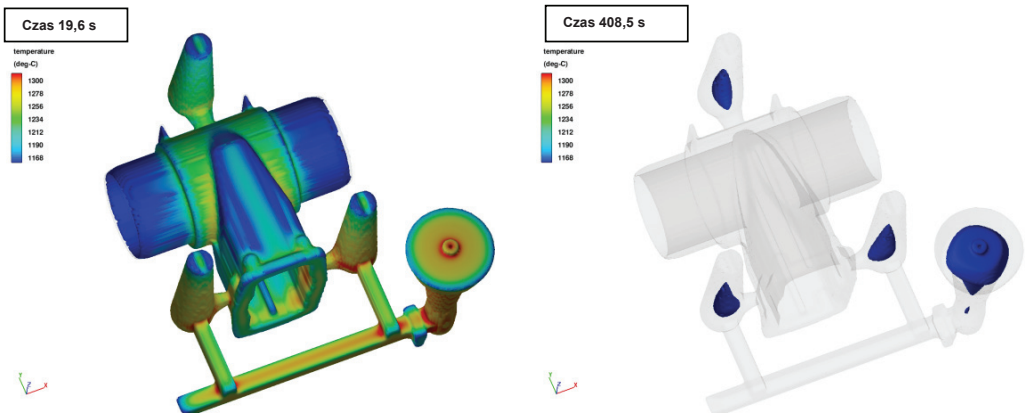
When comparing the above results with the results from Figure 7 (I technology), it may be noted that part of contaminated liquid metal was transported to the feedhead, where it concentrated in its upper part. The application of an additional feeder attached

przeniesiona do nadlewu, gdzie skoncentrowała się w górnej jego części. Zastosowanie dodatkowego zasilacza dołączonego do części tylnej korpusu pozwala na zasilenie króćców. Stworzony węzeł cieplny przenosi porowatości do wewnątrz zasilacza. Rysunek 13 przedstawia ścieżkę krzepnięcia odlewu.

Porównując porowatości powstające w krzepnącym odlewie dla koncepcji technologii pierwszej – rysunek 9 i drugiej – rysunek 14, można stwierdzić, że korzystniejsza jest technologia druga. Dłużej krzepnący obszar przy tylnej części odlewu wywołany przez zasilacz, spełnia swoje zadanie zasilenia węzła cieplnego.

to the rear part of the body provides feeding to connectors. The created heat center transfers porosity inside the feeder. Figure 13 shows the path of solidification of the casting.

When comparing the resulting porosity in solidifying casting for the first technology (Figure 9) and the second technology (figure 14), it can be concluded that the second technology is more beneficial. Longer solidifying area in the rear part of the casting caused by the feeder serves its purpose and feeds the heat center.



a) b)

Rys. 13. Symulacja krzepnięcia ciekłego metalu w odlewie

Fig. 13. The simulation of solidification of liquid metal in the casting

Rys. 14. Prognozowana porowatość w odlewie korpusu

Fig. 14. Projected porosity in the casting

Analiza numeryczna procesu odlewania oraz krzepnięcia korpusu DN150 pozwala na weryfikację oraz dobór optymalnej koncepcji technologii odlewania. Zaleca się wykorzystanie koncepcji drugiej.

The numerical analysis of the process of pouring and solidification of DN150 body allows us to verify and select the optimum concept of the casting technology. It is recommended to apply the second technology.

Technologia odlewania pokrywy

Przygotowanie projektu układu wlewowo-zasilającego zostało poprzedzone wykonaniem symulacji krzepnięcia detalu. Na rysunku 15 zostało przedstawione rozmieszczenie jam skurczowych przy idealnych warunkach krzepnięcia oraz rozkładu temperatury.

Technology of cap casting

The preparation of the design of the gating-feeding system was preceded by the simulation of piece solidification. Figure 15 shows the placement of shrinkage cavities under ideal conditions of solidification and temperature distribution.

Rys. 15. Rozkład porowatości w symulowanej pokrywie

Fig. 15. Distribution of porosity in the simulated cap

Wizualizacja symulacji przedstawiona na rysunku 15 została wykorzystana na zaprojektowanie układu wlewowego. Na rysunku 16 została przedstawiona zaprojektowana technologia odlewania, która została wykorzystana w symulacji w celu weryfikacji poprawności założeń konstrukcyjnych.

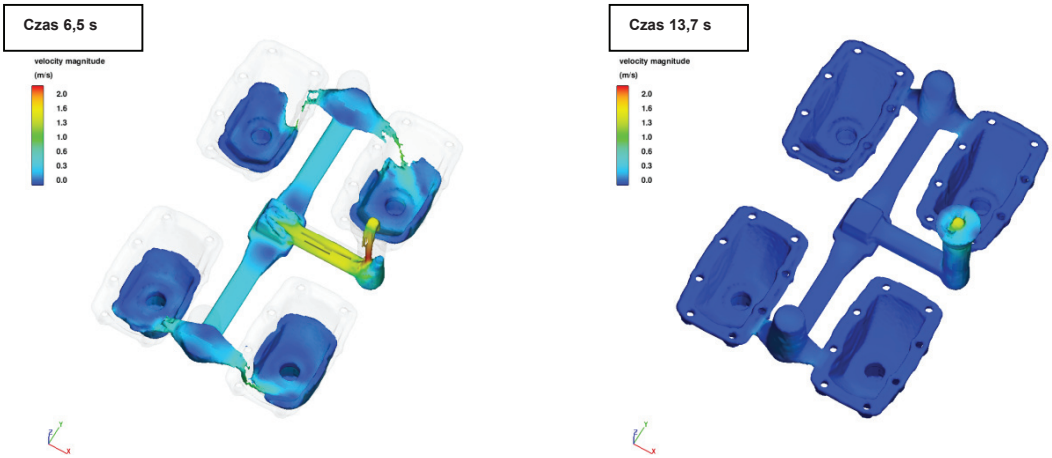
Figure 15 shows the visualization of the simulation that was used to design the gating system. Figure 16 shows the designed casting technology, which was used in the simulation in order to verify the accuracy of structural assumptions.

Rys. 16. Zaprojektowana technologia odlewania z modelami odlewniczymi

Fig. 16. Designed casting technology with casting models

Symulacja pozwoliła na określenie: charakteru przepływu ciekłego metalu przez układ wlewowy, tworzących się zaburzeń powierzchni swobodnej ciekłego stopu oraz ich koncentracji w poszczególnych miejscach we wnęce. Na rysunku 17 została przedstawiona wizualizacja przepływu ciekłego metalu przez układ wlewowy. Występujące prędkości około 1 m/s, nie powinny powodować uszkodzeń wnęki formy.

The simulation allowed us to determine the character of the flow of liquid metal through the gating system, the resulting defects to free surface of liquid alloy and their concentration in various areas of the cavity. Figure 17 shows the simulation of the flow of liquid metal through the gating system. Present velocities, about 1 m/s, should not cause damages to the mold cavity.

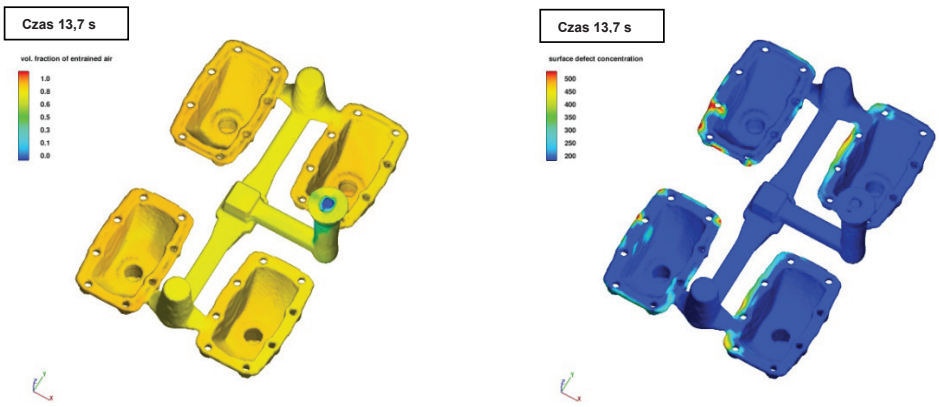


Rys. 17. Symulacja procesu wypełniania wnęki formy pokrywy

Fig. 17. The simulation of filing process of cap mold cavity

Symulacja pozwala przybliżyć, w których obszarach ciekły metal wpłynie w ostatnim etapie wypełniania wnęki formy. Droga przebyta przez ciekły metal wynosi około 1,8 m. Wizualizacja w postaci zaburzenia powierzchni swobodnej oraz stopień narażenia na kontakt z powietrzem, a tym samym tworzenie się tlenków na powierzchni przepływającego metalu została przedstawiona na rysunku 18.

The simulation clarifies to which areas liquid metal will flow in the final stage of filling of mold cavity. The distance traveled by liquid metal amounts to ca. 1.8 m. Figure 18 shows the visualization of free surface and degree of exposure to air, resulting in the creation of oxides on the surface of the flowing metal.



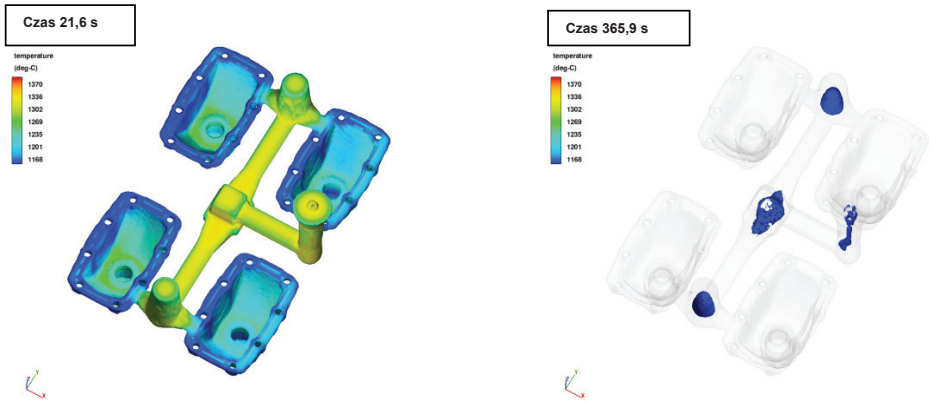
a) b)

Rys. 18. Wizualizacja procesu wypełniania wnęki formy pokrywy: a) powierzchnia kontaktu ciekłego metalu z powietrzem, możliwość powstania tlenków na jej powierzchni; b) koncentracja zaburzenia powierzchni swobodnej

Fig. 18. The visualization of the filling of cap mold cavity: a) contact surface of liquid metal with the air, possibility of oxides on the surface; b) free surface defect concentration

Następnie została wykonana symulacja krzepnięcia z prognozą tworzenia się porowatości (rys. 19 i 20).

In the next step we conducted the simulation of solidification with projection of porosity creation (Fig. 19 and 20).



Rys. 19. Symulacja krzepnięcia ciekłego metalu w odlewie
Fig. 19. The simulation of solidification of liquid metal in the casting

Rys. 20. Prognozowana porowatość w odlewie pokrywy
Fig. 20. Projected porosity in cap casting

Technologia odlewania klina

Koncepcja odlewania klina do korpusu DN150 jest przygotowana dla płyty modelowej z czterema detalami. Klin jest elementem poddawanym wulkanizacji, w celu nadania jej właściwości uszczelniających w czasie pracy w zasuwie. Na rysunku 21 została przedstawiona technologia odlewania klina korpusu.

Przedstawiony układ został zasymulowany w celu oceny przepływu metalu, krzepnięcia oraz określenia wstępnej jakości odlewu.

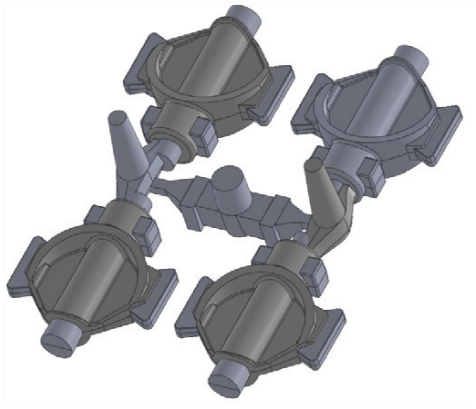
Na rysunku 22 została zamieszczona wizualizacja procesu wypełniania wnęki formy przez ciekły metal.

Technology of wedge casting

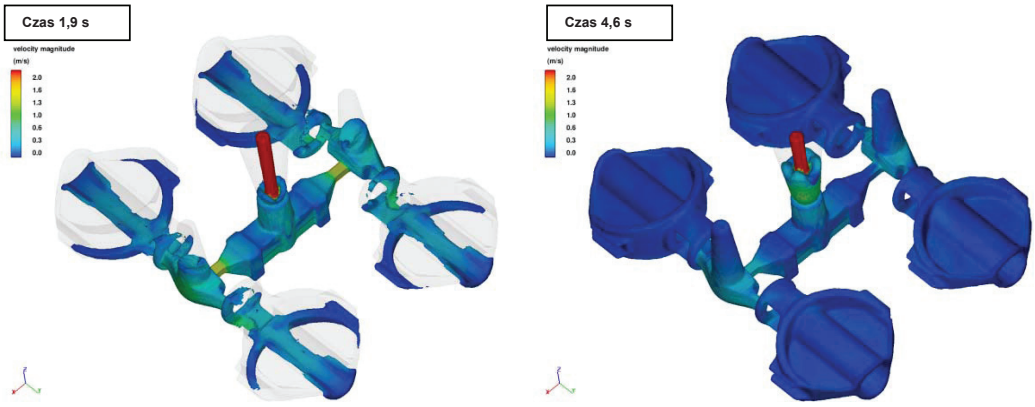
The concept of wedge casting for DN150 body was prepared for the match plate with four pieces. The wedge element is subject to vulcanization in order to create sealing properties during the operation of the wedge in the gate valve. Figure 21 shows the technology of wedge casting.

The presented arrangement was simulated to assess the flow of metal and solidification, as well as to determine the preliminary quality of the casting.

Figure 22 shows the visualization of the process of filling the mold cavity with liquid metal.



Rys. 21. Zaprojektowana technologia odlewania z modelami odlewniczymi
Fig. 21. Designed casting technology with casting models



a) b)

Rys. 22. Symulacja wypełniania wnęki formy klina ciekłym metalem
Fig. 22. The simulation of the process of the filling of wedge mold cavity with liquid metal

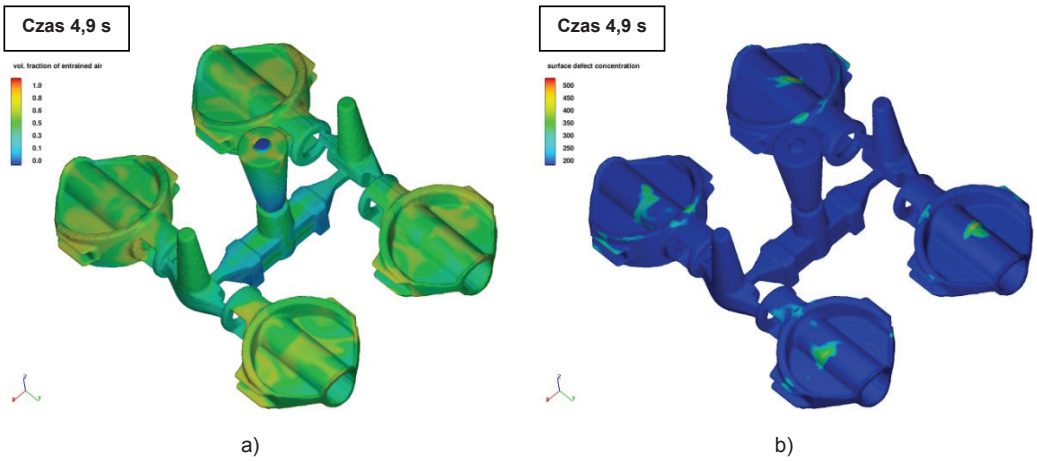
Metal wpływa z prędkością około 1 m/s. Jest to dopuszczalna prędkość wpływania metalu gwarantująca spokojne wypełnianie wnęki formy. Oceniono również drogę, jaką musiał pokonać ciekły metal, wypełniając wnękę formy. Całkowita długość drogi przebytej przez pierwszą porcję metalu, która wpłynęła do wnęki formy, wyniosła około 1 m. Wyniki analizy zamykania powietrza wewnątrz płynącego metalu oraz zaburzenia powierzchni swobodnej przepływającego ciekłego metalu pozwalają zauważyć, że zaburzenia są na niskim poziomie. Ilość powietrza zamkniętego w ciekłym metalu oraz koncentrację zaburzeń powierzchni swobodnej metalu przedstawia rysunek 23.

Analizując charakter krzepnięcia (rys. 24), można zauważyć przerwanie ścieżki zasilania, rozerwanie i oddzielenie się obszarów krzepnących objętościowo wewnątrz odlewu. W odciętych obszarach mogą powstawać wady związane ze skurczem metalu (rys. 25). Późniejsze pokrywanie gumą (wulkanizo-

Metal flows in with the velocity of about 1 m/s. It is an acceptable velocity guaranteeing the steady filling of mold cavity. The distance traveled by liquid metal to fill the whole cavity was also calculated. The total distance traveled by the first portion of metal that flowed to the mold cavity amounts to ca. 1 m. The results of the analysis of the air entrapped in liquid metal and defects to the free surface of the flowing liquid metal allow us to conclude that disruptions are at a low level. Figure 23 shows the amount of the air entrapped in liquid metal and the concentration of defects to free surface of the metal.

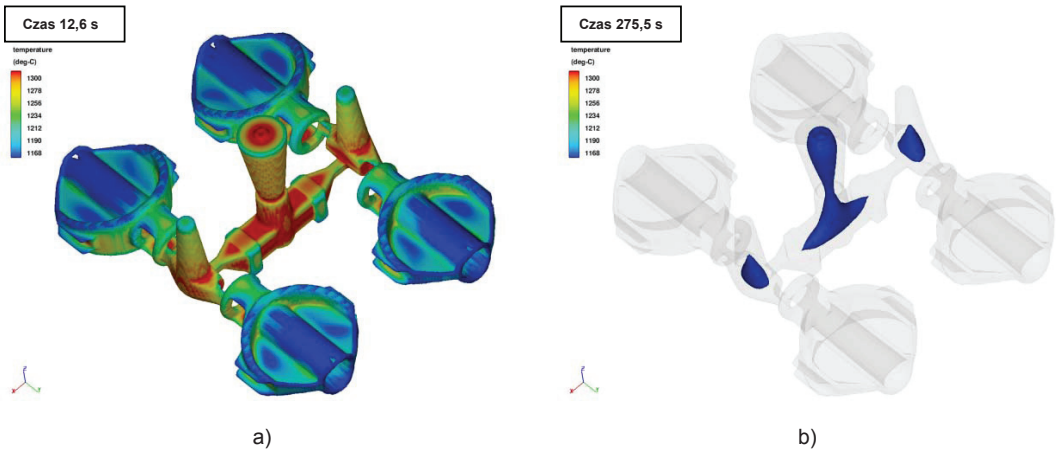
When analyzing the solidification pattern (Fig. 24), we can observe the interruption of the feeding path, as well as disruption and separation of equiaxed solidifying areas inside the casting. Separated areas can be defective due to metal contraction (Fig. 25). Further covering with rubber (vulcanization) will reduce the influence of defects on component operation.

wanie) powoduje, że występowanie niewielkich wad nie wpłynie na eksploatację elementu.



Rys. 23. Wizualizacja procesu wypełniania wnęki formy klina: a) powierzchnia kontaktu ciekłego metalu z powietrzem; b) koncentracja zaburzenia powierzchni swobodnej

Fig. 23. The visualization of the filling of wedge mold cavity: a) contact surface of liquid metal with the air, possibility of oxides on the surface; b) free surface defect concentration



Rys. 24. Ścieżka krzepnięcia odlewu klina

Fig. 24. The path of solidification of wedge casting

Rys. 25. Prognozowana porowatość w odlewie klina

Fig. 25. Projected porosity in wedge casting

Wnioski

1. Symulacja komputerowa pozwala na wizualizację oraz wstępną ocenę charakteru przepływu ciekłego metalu przez układ wlewowy. Umożliwia to analizę poprawności zaprojektowanego układu model-układ wlewowy oraz – jeżeli zaistnieje konieczność – wprowadzenie zmian na etapie projektowania technologii odlewniczej. Ocena charakteru przepływu oraz prędkości, jakie występują podczas przepływu pozwala na stwierdzenie czy płynący ciekły metal może powodować penetrację formy oraz czy minimalna prędkość podnoszenia się lustra metalu w formie jest zachowana. Wyznaczenie drogi, jaką pokonał ciekły metal pozwala na wstępną ocenę rozkładu temperatury, jaka występuje w ciekłym metalu, co przekłada się bezpośrednio na wskazanie obszaru, który zacznie krzepnąć, jako pierwszy.
2. Symulacja procesu krzepnięcia pozwala na prognozę charakteru krzepnięcia oraz ocenę, jakości zasilania zapewnianego przez zastosowane nadlewy. Dodatkowo wyznaczone zostają obszary krzepnące jako ostatnie. Jeżeli taki obszar znajduje się wewnątrz odlewu oraz zostaje pozbawiony zasilania może być narażony na tworzenie się wad pochodzenia skurczowego.
3. Przeanalizowanie dwóch koncepcji technologii odlewania największego odlewu – korpusu pozwala wybrać bardziej optymalną konstrukcję. Wybór musi być podyktowany, oprócz czynników wyznaczonych przez charakter pracy, czynnikami ekonomicznymi. Zastosowanie kolejnego zasilacza wiąże się z koniecznością stopienia dodatkowej porcji metalu, co zwiększa koszt wytworzenia pojedynczego odlewu. Jednak wprowadzenie dodatkowego źródła zasilania odlewu może przełożyć się na zmniejszenie ilości brakowych odlewów do minimum.
4. Wyniki symulacji komputerowej posłużyły do opracowania rysunków konstrukcyjnych płyt modelowych do wykonywania odlewów zasuw do instalacji gazowych DN150.

Podziękowania

Publikacja powstała w oparciu o wyniki badań przemysłowych wykonywanych w ramach projektu celowego ROW-III-209/2012 pt.: „Opracowanie i wdrożenie do produkcji typoszeregu zasuw klinowych z króćcami z rur PE do gazociagów z rur PE". Autorzy realizujący badania przemysłowe z ramienia Instytutu Odlewnictwa w Krakowie dziękują Szefowi Rozwoju Fabryki Armatur JAFAR SA Mieczysławowi Nowakowi wraz z zespołem za współpracę przy realizacji tych badań.

Conclusions

1. Computer simulation allows us to visualize and conduct the preliminary assessment of the character of flow of liquid metal through the gating system. In this way, we can analyze the accuracy of the designed arrangement: model-gating system, and if necessary, introduce changes at the stage of developing the casting technology. The assessment of the character and velocity of flow allows us to state whether the flowing liquid metal can cause penetration of the mold and whether the minimum velocity of metal rising in the mold is sufficient. The calculation of the distance traveled by liquid metal allows for the preliminary assessment of the distribution of temperature in liquid metal, and therefore we can indicate the area that will solidify first.
2. The simulation of the solidification process allows us to project its pattern and assess the quality of feeding provided by applied feedheads. Moreover, we can determine areas solidifying last. If such an area is located inside the casting and it is left without feeding, it can be subjected to defects of shrinkage origin.
3. The analysis of two technological concepts of casting of the valve's biggest component – the body – allows us to choose an optimum construction. This choice must be based not only on the factors set forth by the character of work, but also on economic aspects. The application of one more feeder involves melting of an additional amount of metal, which results in higher production costs of one casting. However, the application of an additional source of feeding might result in a minimum number of defective castings.
4. The results of computer simulation were used to develop construction drawings of match plates for the production of castings of DN150 gate valves for gas installations.

Acknowledgements

This publication is based on the results of industrial research carried out under the Targeted Project No. ROW-III-209/2012: "Development and implementation of the production of series of types of gate valves with PE pipe connectrors for gas piplines made of PE pipes". The authors conducting the industrial research for Instytut Odlewnictwa (Foundry Reserach Institute) in Krakow would like to thank Mr. Mieczysław Nowak, Development Manager in Fabryka Armatur JAFAR SA (fittings manufacturer), and his team for their cooperation during the performance of the research.

Literatura/References

1. Gwiżdż A., Żuczek R., Nowak M. (2012). Analiza stanu naprężeń w konstrukcjach odlewu korpusu, pokrywy i klina zasuw klinowych do gazu. *Prace Instytutu Odlewnictwa*, *52*(4), 133–160.
2. Gwiżdż A., Małysza M., Nowak M. (2012). *Badania modelowe i analiza rozpływu metalu i krzepnięcia w formach odlewniczych*. Sprawozdanie z zadania nr 4 projektu celowego NOT ROW-III-209/2012.
3. *Instrukcja Flow-3D V.10 manual*.
4. Allison J., Backman D., Christodoulou L. (2006). Integrated Computational Materials Engineering: A New Paradigm for the Global Materials Profession. *JOM*, 11, 25–27.
5. Maj M., Piekło J. (2009). MLCF – an optimised program of low – cycle fatigue test to determine mechanical properties of cast materials. *Archives of Metallurgy and Materials*, *54*(2), 393–397.
6. Ignaszak Z., Mikołajczyk P. (2007). Problem empirycznych parametrów pre-processingu na przykładzie symulacji krzepnięcia i zalewania odlewów z żeliwa sferoidalnego. [W:] *Innowacje w odlewnictwie. Część I*. Kraków: Instytut Odlewnictwa, 301–309.
7. Tabor A., Rączka J.S. (1998). *Projektowanie odlewów i technologii formy*. Kraków: Wyd. FOTOBIT.
8. Sorelmetal (2006). *O żeliwie sferoidalnym*. Warszawa: Metals Minerals Sp. z o.o.