

**Symulacja ilości i rozmieszczenia powietrza zamkniętego wewnątrz ciekłego metalu w testowej formie ciśnieniowej**

**Simulation of the volume and distribution of air entrapped by liquid metal in a test mould for the pressure die casting process**

Marcin Małysza<sup>1</sup>, Stanisław Pysz<sup>1</sup>, Aleksander Fajkiel<sup>2</sup>, Piotr Dudek<sup>2</sup>, Krzysztof Saja<sup>2</sup>, Michał Woś<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, Pracownia Projektowania Komputerowego Procesów Odlewniczych, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

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

<sup>3</sup>Econocap Polska sp. z o.o., ul. Skibowa 91, 50-230 Wrocław

<sup>1</sup>Foundry Research Institute, Centre for Designing and Prototyping, Section of Computer-Aided Designing and Foundry Process, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

<sup>2</sup>Foundry Research Institute, Non-Ferrous Metal Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

<sup>3</sup>Econocap Polska sp. z o.o., ul. Skibowa 91, 50-230 Wrocław, Poland

E-mail: marcin.malysza@iod.krakow.pl

**Streszczenie**

**Abstract**

Programy komputerowe są aktualnie powszechnym narzędziem wykorzystywanym podczas inżynierskich prac konstruktorskich i projektowych. Projektowanie form ciśnieniowych w oparciu o założenia konstrukcyjne detalu, dzięki możliwości tworzenia brył przestrzennych, umożliwia szybkie przygotowanie dokumentacji technologicznej. Konstruktor ciśnieniowych form odlewniczych, kierując się przesłankami technologicznymi, musi stworzyć odpowiednie warunki dla przepływającego ciekłego metalu, a z drugiej strony – zapewnić odpowiednie odpowietrzenie i chłodzenie formy ciśnieniowej. Możliwość wcześniejszej weryfikacji założeń konstrukcji wnętrza formy ciśnieniowej oraz wizualizacja procesu jej wypełniania pozwala na skrócenie czasu, ograniczenie kosztów przygotowania i wdrożenia odlewu do produkcji. Na rynku światowym istnieje wiele programów pozwalających na prowadzenie analizy symulacyjnej procesu odlewania, krzepnięcia oraz innych zjawisk towarzyszących procesom kształtowania odlewu. W artykule przedstawiona została analiza zachowania się powietrza atmosferycznego w warunkach procesu odlewania pod wysokim ciśnieniem. Symulacje komputerowe przeprowadzono w programie Flow-3D, wykorzystując uproszczoną geometrię testową odlewu. Wyniki w postaci wizualizacji zostały przedstawione dla formy ciśnieniowej z oraz bez odpowietrzającej, inżektorowej wkładki „schodkowej”.

**Słowa kluczowe:** odlewanie ciśnieniowe, symulacje komputerowe, odpowietrzająca wkładka inżektorowa

Computer programs are now a common tool aiding the engineer's work on structure design. The design of foundry moulds used in the pressure die casting process, based on the casting design and effectively utilising the ability to create 3D images of solid bodies, allows for quick preparation of technological documentation. The designer of foundry moulds, guided by technological premises, has to create the right conditions for the liquid metal flow and ensure proper die venting and cooling mould pressure. The possibility of early verification of the die cavity design with visualization of how it will be filled with molten metal reduces both time and cost of the casting preparation and implementation into production. There are many programs on the world market that perform simulation and analysis of pouring, solidification, and other phenomena and operations accompanying the casting shaping process. This article presents an analysis of ambient air behaviour under conditions of high pressure die casting. Computer simulations were performed using Flow-3D software on a test casting of simplified geometry. The results were displayed in a visual form for the die with and without the “stepped” venting injector insert.

**Keywords:** pressure die casting, computer simulation, venting injector insert

## 1. Wstęp

Odlewanie pod wysokim ciśnieniem jest najczęściej stosowaną metodą odlewania stopów metali nieżelaznych w Polsce i na świecie. Produkcja odlewów ciśnieniowych w Polsce w 2013 r. osiągnęła wartość 66,9 tys. ton [1]. Nowoczesny proces odlewania ciśnieniowego może być w pełni zautomatyzowany, zapewniając tym samym osiągnięcie bardzo wysokich zdolności produkcyjnych [2]. Ta metoda odlewania, ze względu na wywieranie ogromnych sił na ciekły metal przez tłok prasujący maszyny ciśnieniowej, powoduje, że jest to proces bardzo dynamiczny. Przepływający ciekły metal może w szczelinie wlewowej osiągać prędkości rzędu 100 m/s lub więcej. Uzyskiwanie tak wysokich prędkości oznacza, że metal wypełnia wnękę formy w czasie rzędu kilku/kilkunastu milisekund, natomiast materiał, z którego wykonana jest forma ciśnieniowa oraz system jej chłodzenia powodują, że niemal natychmiast odlew gotowy jest do usunięcia z formy [3]. Bardzo szybkie chłodzenie pozwala na uzyskanie drobnoziarnistej struktury zapewniającej wysokie właściwości wytrzymałościowe. Korzyścią odlewania ciśnieniowego jest doskonała jakość powierzchni gotowego detalu. Odlewy wykonywane tą techniką znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu: środków transportu, elektromechanicznego, gospodarstwa domowego itp.

Ze względu na wysokie wymagania stawiane odlewom odpowiednie zaprojektowanie formy ciśnieniowej i jej wykonanie nie jest zadaniem łatwym. Dlatego też właściwe usytuowanie odlewów, rdzeni stałych i ruchomych, dobór przekrojów wlewów doprowadzających, wielkości przelewów i odpowietrzeń wymaga zastosowania wspomaganie komputerowego procesu projektowania. Projekt układu wlewowego oraz przelewów i odpowietrzeń powinien zapewniać z jednej strony optymalne warunki wypełniania wnęki formy, z drugiej natomiast – minimalizację zjawiska okluzji gazowej. Zamykanie powietrza w ciekłym metalu jest zjawiskiem niemożliwym w pełni do wyeliminowania, a jedynie można ograniczyć jego wpływ lub stworzyć warunki takie, aby wszelkiego rodzaju nieciągłości wynikające z tworzenia się porowatości zostały przesunięte do przelewów. Wady porowatości gazowej występujące w odlewie w przypadku ich ujawnienia drogą obróbki ubytkowej, powodują znaczne obniżanie właściwości mechanicznych, takich jak: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, przewodnictwo cieplne i elektryczne, a przede wszystkim obniżają szczelność [4].

Okluzja fazy gazowej i utlenianie stopu następuje w kąpielii metalowej już na etapie przygotowywania ciekłego metalu [5, 6]. Dodatkowo zagazowanie i utlenianie stopu zachodzi podczas przelewania metalu z pieca topialnego do pieca podgrzewczego oraz w trakcie wlewania go do komory wlewowej maszyny ciśnieniowej. Po właniu określonej porcji ciekłego metalu do komory prasowania następuje włączenie pierwszej fazy proce-

## 1. Introduction

High-pressure die casting is the method most widely used in Poland and in the world for casting of non-ferrous alloys. In 2013, the production volume of pressure die castings in Poland reached the level of 66.9 thousand tonnes [1]. Modern pressure die casting process can be fully automated, thus ensuring the achievement of very high production capacity [2]. The enormous forces exerted on molten metal by the plunger moving in a die casting machine make pressure die casting a very dynamic process. The flowing liquid metal may reach in the pouring slot the velocity of 100 m/s or more. Obtaining such a high velocity means that the metal fills the die cavity in the time of a few or a few dozen milliseconds, and both the material of which the die has been made as well as its cooling system make the casting almost immediately ready for ejection [3]. Very rapid cooling produces a fine-grained structure, ensuring high strength properties. The advantage of die casting is excellent surface quality of the finished part. Castings made by this technique are widely used in many industries, to mention as an example transport equipment, electromechanical equipment, home appliances, etc.

With very high requirements imposed onto castings, ensuring proper design and performance of a die is not an easy task. Therefore, for the correct positioning of castings and cores fixed and mobile, for the choice of ingate cross-section and the size of overflows and vents, the use of computer-aided design is nowadays a must. The design of a gating system and of overflows and vents should guarantee, on the one hand, optimum filling of the die cavity with molten metal and, on the other hand - minimize the effect of gas occlusion. Air entrapment in a liquid metal volume is the phenomenon that can never be fully eliminated or avoided. What can be done, however, is reducing its impact, or creating such conditions that all sorts of discontinuities resulting from the formation of porosity will be "pushed" to overflows. The defects caused by gas porosity present in the casting, when disclosed by machining, may seriously deteriorate the casting properties, including tensile strength, elongation, thermal and electrical conductivity, and above all tightness of the casting [4].

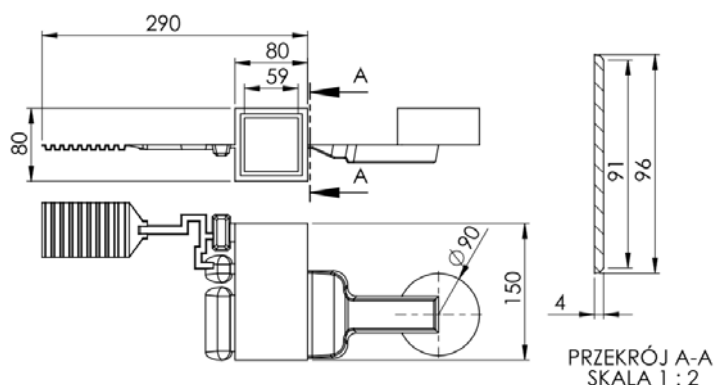
Occlusion of the gaseous phase and alloy oxidation take place in the melt as early as at the stage of the liquid metal processing [5, 6]. The increase in gas content and further oxidation of the melt occur during transfer of metal from the melting furnace to the holding furnace and during pouring of metal into the shot sleeve of a pressure die casting machine. After pouring a predetermined volume of liquid metal into the shot sleeve, the first stage of the process starts and it consists in "pushing" and "pressing" the liquid metal, preferably at a speed that allows the atmospheric air to be evacuated from the area above the metal surface and transferred to the area of the pouring slot. The second stage is con-

su, która powoduje spiętrzanie ciekłego metalu, najlepiej z prędkością umożliwiającą ewakuację powietrza atmosferycznego z nad lustra metalu i doprowadzenie go w okolice szczeliny wlewowej. Druga faza jest uważana za odlewanie właściwe, gdyż podczas tej fazy następuje zadaną prędkością i ciśnieniem wypełnianie wnęki formy ciśnieniowej, co bezpośrednio przekłada się na jakość i odwzorowanie kształtu odlewu. W trzeciej fazie następuje tzw. doprasowanie, którego celem jest efektywne zmniejszenie wymiarów pęcherzy gazowych zamkniętych podczas przepływu ciekłego metalu.

## 2. Zachowanie fazy gazowej we wnęce testowej formy ciśnieniowej

W technologii odlewania pod ciśnieniem zwiększona okluzja fazy gazowej w odlewie jest nieunikniona, bowiem wynika ona z „burzliwego” wypełniania wnęki formy. Z tego powodu zadaniem konstruktora form ciśnieniowych jest zaprojektowanie i rozmieszczenie wlewów doprowadzających oraz elementów konstrukcyjno-technologicznych (przelewów i odpowietrzeń) w ilościach i wielkościach umożliwiających ograniczenie okluzji fazy gazowej w odlewie do minimum.

Dla realizacji celu pracy – analizy zachowania się fazy gazowej we wnęce formy ciśnieniowej podczas wypełniania jej ciekłym metalem – skonstruowano model odlewu i wnękę formy dla jego odwzorowania, zaprezentowaną na rysunku 1.



Rys. 1. Rzut wymiarów oraz przekrój szczeliny wlewowej testowej formy ciśnieniowej

Fig. 1. View of dimensions and cross-section of the pouring slot in a test die

Wnęka testowej formy ciśnieniowej została zaprojektowana z zachowaniem wszystkich wymogów technologicznych, jak dla odlewu rzeczywistego ze stopu aluminium o określonej masie (objętości) i średniej grubości ścianki [7–8].

Komputerowa analiza numeryczna (symulacja) wypełniania wnęki formy ciśnieniowej została przeprowadzona pod kątem analizy przepływu fazy gazowej znajdującej się we wnęce formy. Ciekły metal podczas wypełniania wnęki formy powoduje przemieszczanie

considered proper casting operation, as during this stage, at a predetermined speed and pressure, the die cavity is being filled with molten metal with direct impact on the casting quality and faithful reproduction of its shape. In the third stage, the metal is additionally “squeezed” to effectively reduce the size of gas bubbles captured during its flow.

## 2. Gaseous phase behaviour in the test die cavity

Gaseous phase occlusion in molten metal during pressure die casting is inevitable, as it stems from the “turbulent” filling of die cavity. For this reason, the task of the designer of foundry moulds is to propose such a design of the die and the number, size and arrangement of ingates and other elements necessary in this technology (overflows and vents) that will reduce to a minimum the entrapment of the gaseous phase in casting.

To achieve the goal of this study, which is analysis of the gaseous phase behaviour in the die cavity when this cavity is being filled with molten metal, a model of the casting and die cavity reproducing this casting has been made and is shown in Figure 1.

Wielkości charakterystyczne geometrii odlewów:

- $V_k$  (objętość komory) = 1018 cm<sup>3</sup>
- $V_o$  (objętość odlewu) = 323 cm<sup>3</sup>
- $V_p$  (objętość przelewów) = 25 cm<sup>3</sup> = (0,2–0,3) $V_o$
- $V_r$  (objętość krążka – piętki) = 160 cm<sup>3</sup>
- $V_w$  (objętość wlewu) = 114 cm<sup>3</sup>
- $F_t$  (powierzchnia czołowa tłoka) = 63,6 cm<sup>2</sup>
- $Z$  (stopień wypełnienia komory) = 70%
- $F_{od}$  (powierzchnia odpowietrzeń, cm<sup>2</sup>) = (1/3–2/3)  $f_s$   
(powierzchnia przekroju poprzecznego szczeliny wlewowej, cm<sup>2</sup>)

się fazy gazowej powietrza przez różne przekroje modelowanej geometrii odlewu w kierunku przelewów i odpowietrzeń.

Podstawą zjawiska fizycznego związanego ze zmianą objętości gazu zamykanego przez przepływający ciekły metal jest równanie van der Waalsa, które łączy parametry stanu gazu (1) [9]:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right) \cdot (V_m - b) = RT \quad (1)$$

gdzie:

a, b – stałe van der Waalsa charakterystyczne dla danego gazu,

$V_m$  – objętość jednego mola gazu,

p – ciśnienie,

T – temperatura,

R – uniwersalna stała gazowa.

Po uproszczeniu równania 1 i zastosowaniu współczynnika kompresji „z” równanie to można zapisać w postaci (2):

$$PV = znRT \quad (2)$$

Analiza zachowania się fazy gazowej w badanym układzie wnętrza formy ciśnieniowej wymaga pewnych uproszczeń w celu przyspieszenia procesu obliczeniowego. Z bazy danych wybrano stop aluminium A360, założono stałą lepkość  $\mu = 0,0012 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ , co odpowiada warunkom temperatury początkowej stopu  $T_{in} = 620^\circ\text{C}$ , materiał formy ciśnieniowej stal H-13 oraz izotermiczne warunki przepływu ciekłego metalu.

### 3. Analiza numeryczna

Analiza numeryczna procesu wypełniania została przeprowadzona dla dwóch wariantów odpowietrzania wnętrza formy, które przedstawiono na rysunku 2. W pierwszym wariantcie (rys. 2a) zastosowano klasyczny sposób odpowietrzania z przelewów, w drugim natomiast – odpowietrzanie, jak dla systemu odlewania w tzw. „próżni” z zakończeniem wkładką iniektorową (rys. 2b). Dodatkowo w procesie symulacji został uwzględniony etap ruchu tłoka w komorze wlewowej w czasie spiętrzania ciekłego metalu, co odzwierciedla warunki podczas rzeczywistego procesu odlewania ciśnieniowego.

Proces ruchu tłoka symulacyjnie rozpatrywany jest w dwóch fazach. Na rysunku 3 został przedstawiony wykres prędkości w funkcji czasu. Położenie wyłącznika

entry, ultimately pushing it towards the overflows and vents.

The physical phenomenon of gas changing its volume when enclosed by the flowing liquid metal is based on van der Waals equation that shows a relationship between the parameters of the state of gas (1) [9]:

where:

a, b – van der Waals constants, both characteristic of a particular gas,

$V_m$  – molar volume of gas,

p – pressure,

T – temperature,

R – universal gas constant.

After the simplification of equation 1 and application of the compression ratio “z” the equation can be written as (2):

Analysis of the gaseous phase behaviour in a test die cavity requires certain simplifications to speed up the calculation process. From the database, A360 aluminium alloy was selected, and the following parameters have been adopted: a constant viscosity  $\mu = 0.0012 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ , which corresponds to the temperature of  $T_{in} = 620^\circ\text{C}$ , H-13 steel as a die material, and isothermal conditions for the liquid metal flow.

### 3. Numerical analysis

Numerical analysis of the die filling process was carried out for two variants of the die cavity venting system, both of which are shown in Figure 2. In the first variant (Fig. 2a), the traditional venting system from the overflows was used, while in the second case the venting system resembled the system used in “vacuum” casting, i.e. the system using an injector insert (Fig. 2b). Additionally, the simulation process included the stage of plunger movement in the chamber during “pressing” of molten metal, thus reflecting the conditions occurring in the actual pressure die casting process.

It has been assumed in simulation that the plunger movement consists of two different stages. Figure 3 shows a graph of velocity related to time. The position

krańcowej drugiej fazy ruchu tłoka zostało wyznaczone ze wzoru (3) [11]:

$$s_1 = \frac{1}{F_t} \left[ V_k \left( 1 - \frac{Z}{100} \right) + V_w \right] = l_f \left( 1 - \frac{Z}{100} \right) + \frac{V_w}{F_t} \quad (3)$$

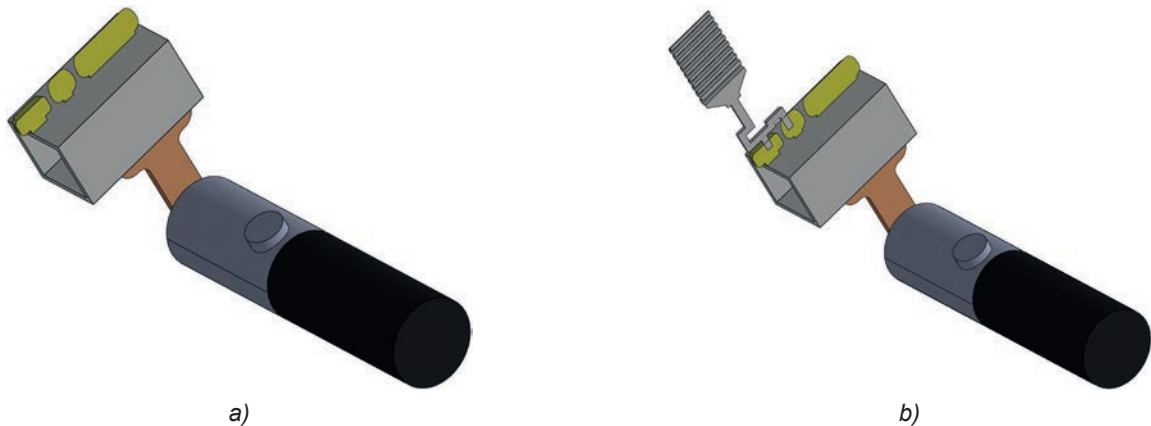
gdzie:

$l_f$  – całkowita długość komory wraz z tuleją wlewową

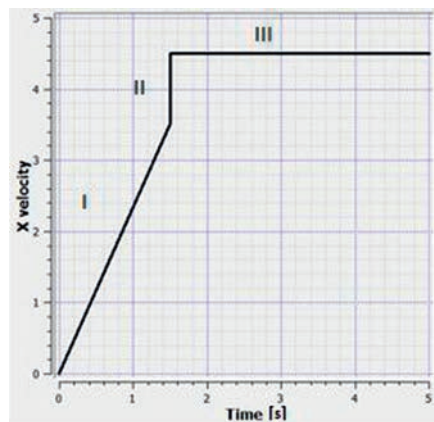
of the microswitch engaging the second stage of the plunger movement is determined from formula (3) [11]:

where:

$l_f$  – the total length of the chamber with the shot sleeve



Rys. 2. Układ wykorzystany w analizie symulacyjnej: a) klasyczne odpowietrzenie, b) z zastosowaną wkładką inżektorową  
Fig. 2. The system used in simulation analysis: a) traditional venting, b) venting with injector insert



Rys. 3. Prędkość przesuwu tłoka prasującego wynikająca z warunków brzegowych symulacji  
Fig. 3. The velocity of plunger movement resulting from the boundary conditions of simulation

Wyznaczone parametry zostały wprowadzone do programu symulacyjnego Flow-3D. Jednocześnie wykorzystując równanie ciągłości strugi, wyznaczono prędkość metalu w szczelinie wlewowej, według następującej zależności (4):

The determined parameters were entered into the Flow-3D simulation program. At the same time, applying the continuity equation of the stream flow, the metal velocity in the pouring slot was calculated from equation (4):

$$V_s = V_{II} \cdot \frac{F_k}{f_s} = 4,5 \cdot \frac{63,58}{4} = 71,5 \quad (4)$$

gdzie:

$V_s$  – prędkość w szczelinie wlewowej,  $m \cdot s^{-1}$ ,

where:

$V_s$  – the velocity in the pouring slot,  $m \cdot s^{-1}$ ,

$V_{II}$  – prędkość drugiej fazy,  $m \cdot s^{-1}$ ,

$F_k$  – powierzchnia przekroju poprzecznego komory prasowania,  $cm^2$ ,

$f_s$  – powierzchnia przekroju poprzecznego szczeliny wlewowej,  $cm^2$ .

Wyznaczona za pomocą wzoru 4 wartość prędkości metalu w szczelinie wlewowej wynosi około  $72 m \cdot s^{-1}$ , natomiast w formie, w zależności od grubości ścianki, prędkość wypełniania waha się w przedziale:  $15-30 m \cdot s^{-1}$ .

$V_{II}$  – the velocity in the second stage of plunger movement,  $m \cdot s^{-1}$ ,

$F_k$  – the cross-sectional area of the pressing chamber,  $cm^2$ ,

$f_s$  – the cross-sectional area of the pouring slot,  $cm^2$ .

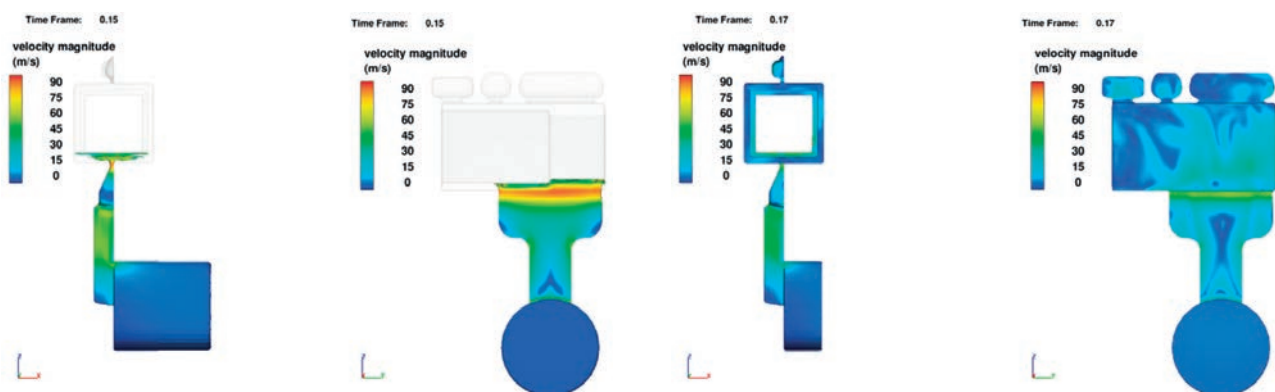
Determined from formula 4, the metal velocity in the pouring slot amounted to about  $72 m \cdot s^{-1}$ , while the rate of die cavity filling depended on wall thickness and was comprised in the range of  $15-30 m \cdot s^{-1}$ .

#### 4. Porównanie wyników symulacji

Analiza wyników symulacji została przedstawiona w postaci wizualnego przemieszczania się strugi ciekłego metalu w układzie wlewowym. Na rysunku 4 została przedstawiona wizualizacja prędkości wypełniania wnęki formy dla przypadku przedstawionego na rysunku 2a.

#### 4. Comparison of simulation results

Analysis of the simulation results included visual representation of the movement of liquid metal stream in a gating system. Figure 4 shows a visual representation of the die cavity filling rate for the case shown in Figure 2a.



Rys. 4. Wizualizacja prędkości we wnęcie formy ciśnieniowej wariantu „a”, początek wypełniania oraz pełne wypełnienie wnęki formy

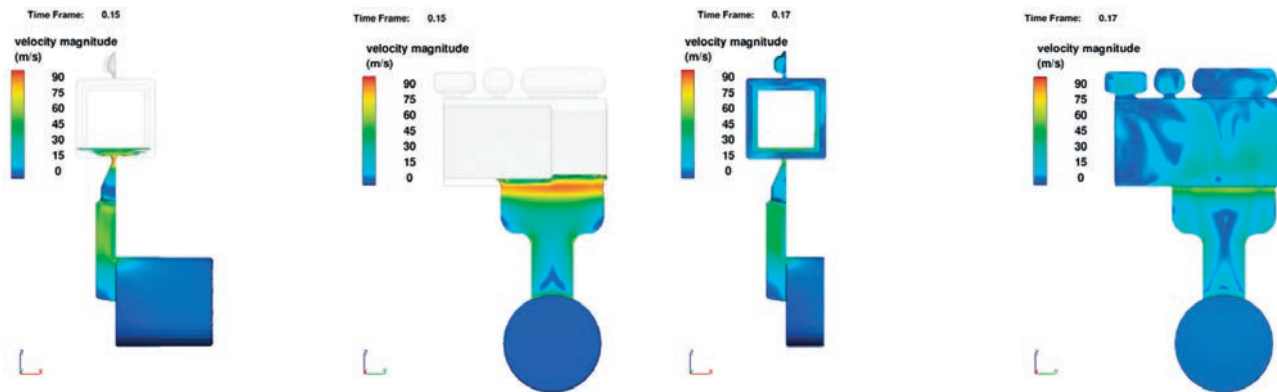
Fig. 4. Visual representation of the velocity of molten metal flow during filling of die cavity in variant “a”, the beginning and the end of die cavity filling

W symulacji, prędkość metalu w szczelinie wlewowej wyniosła ok.  $77 m \cdot s^{-1}$ . Jest to wartość zbliżona do wartości teoretycznej wyznaczonej z równania ciągłości strugi. Na rysunku 5 przedstawiona została prognozowana ilość powietrza zamkniętego wewnątrz ciekłego metalu podczas przemieszczania się frontu metalu w odniesieniu do prędkości ewakuacji fazy gazowej z objętości wnęki formy ciśnieniowej.

Wizualizacja wyników pozwala na ocenę ilości powietrza, która zostanie zamknięta w ciekłym metalu w wyniku przepływu ciekłego metalu w komorze wlewowej, a następnie przez szczelinę doprowadzającą i wnękę formy. Program symulacyjny interpretuje zjawisko okluzji gazowej, jako składową trzech czynników:

In simulation, the velocity of metal in the pouring slot amounted to approx.  $77 m \cdot s^{-1}$  and was close to the theoretical value calculated from the stream continuity equation. Figure 5 shows the predicted air volume entrapped by molten metal during its movement related to the rate of gaseous phase evacuation from the die volume.

Visual representation of the results allows evaluating the air volume which will be occluded in liquid metal by the stream of this metal flowing to fill the shot sleeve, and then passing through the pouring slot and die cavity. The simulation program interprets the phenomenon of gas occlusion as made up of the three main components:



Rys. 5. Wizualizacja wypełniania wnętrza formy ciśnieniowej z uwzględnieniem ilości powietrza zamkniętego przepływającym ciekłym metalem oraz prędkości ewakuacji fazy gazowej z objętości formy

Fig. 5. Visual representation of die cavity filling allowing for the air volume entrapped by flowing molten metal and the rate of gaseous phase evacuation from the die volume

- 1) turbulentnego charakteru przepływu, który występuje zawsze w odlewaniu ciśnieniowym ze względu na zmiany przekrojów i duże prędkości. Charakter przepływu określany jest liczbą Reynoldsa (5):

$$Re = \frac{ul}{\vartheta} = \frac{\rho l \cdot \mu}{\mu} \quad (5)$$

gdzie:

$u$  – prędkość przepływu,  $m \cdot s^{-1}$ ,

$l$  – wymiar charakterystyczny dla ośrodka, przez który przepływa ciecz,  $m$ ,

$\vartheta$  – lepkość kinematyczna,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ,

$\rho$  – gęstość,  $kg \cdot m^{-3}$ ,

$\mu$  – lepkość dynamiczna,  $Pa \cdot s$ .

Taki charakter przepływu powoduje powstawanie perturbacji na froncie płynącego ciekłego metalu.

- 2) grawitacji,  
3) napięcia powierzchniowego

jako czynników stabilizujących przepływ.

Na rysunku 6 został przedstawiony schematyczny sposób interpretacji tych wielkości.

Wizualizacja wyników pozwala zauważyć, że znaczna objętość metalu będzie zawierała powietrze, które zostanie zokludowane w wyniku przepływu ciekłego metalu przez układ wlewowy.

Objętość fazy gazowej jako obszar, w którym zmiany przestrzenne ciśnienia i temperatury, bezwładności

- 1) the turbulent nature of flow always present in the pressure die casting process due to the changing cross-sections and high velocities. The nature of this flow is determined by Reynolds number (5):

where:

$u$  – the flow rate,  $m \cdot s^{-1}$ ,

$l$  – the dimension characteristic of the medium through which the fluid flows,  $m$ ,

$\vartheta$  – the kinematic viscosity,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ,

$\rho$  – the density,  $kg \cdot m^{-3}$ ,

$\mu$  – the dynamic viscosity,  $Pa \cdot s$ .

This type of flow causes perturbations on the front of the flowing liquid metal.

- 2) gravity  
3) surface tension

as the flow stabilizing factors.

Figure 6 shows a schematic interpretation of these parameters.

From the visual representation of the obtained results it follows that a relatively large metal volume will contain the occluded air originating from the liquid metal flow through a gating system.

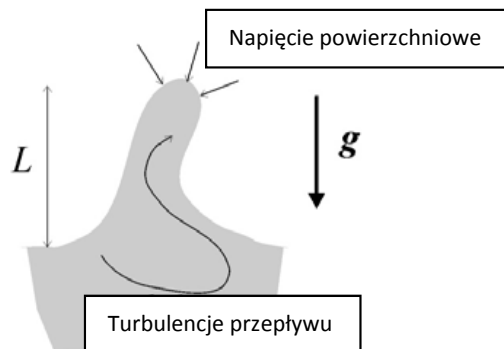
The gaseous phase volume forms a space in which the variations of pressure, temperature, inertia and fric-

i tarcia na styku z ciekłym metalem mogą być pominięte dla danych warunków brzegowych [10]:

- gdy gęstość gazów jest mniejsza niż cieczy,
- zmiany są rozpatrywane na granicy ciecz faza gazowa.

tion in contact with the molten metal can be disregarded for the given boundary conditions [10] when:

- the density of gas is lower than the density of liquid,
- changes are examined at the liquid – gas interface.



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie interpretacji okluzji gazowej  
 Fig. 6. Schematic interpretation of the phenomenon of gas occlusion

Wpływ wielkości pojedynczego elementu siatki obliczeniowej ma bardzo duże znaczenie przy określeniu dokładności obliczeniowej. Bardzo drobne wymiary elementu siatki pozwalają na dyskretyzację obiektu trójwymiarowego ze znaczną dokładnością, co wpływa na wydłużenie czasu obliczeń. W przypadku prowadzonej analizy dobrana została wielkość siatki obliczeniowej zgodnie z zasadą „kciuka”. Odpowiada to utrzymaniu na przekroju ścianki detalu minimum 3 elementów obliczeniowych. Nie została wykonana analiza porównawcza wpływu gęstości siatki na ilość zamkniętego powietrza. Wybór jakości siatki został prowadzony pod kątem zapewnienia optymalnego czasu obliczeniowego.

Drugi wariant symulacji, przedstawiony na [rysunku 2b](#), zakłada zastosowania wkładki inżektorowej, której zadaniem jest ułatwienie ewakuacji fazy gazowej z objętości wnętrza formy. Na [rysunku 7](#) przedstawiono wizualizację prędkości ciekłego metalu we wnętrzu formy dla momentu niemal całkowitego jej wypełnienia dla wariantu „a”. Prędkości występujące w ciekłym metalu są bardzo zbliżone.

Na [rysunku 8](#) przedstawiono wizualizację prędkości ciekłego metalu oraz ciśnienie fazy gazowej w momencie, gdy ciekły metal zaczyna wypełniać objętość wkładki inżektorowej.

W wyniku zmian przekrojów wynikających z konstrukcji wkładki inżektorowej następuje wzrost prędkości ciekłego metalu zgodnie z zachowaniem równania ciągłości strugi, przy jednoczesnym spadku ciśnienia w ciekłym metalu. Wizualizacja zachowania fazy gazowej przedstawiona na [rysunku 8](#) w ostatniej fazie wypełniania wnętrza formy pokazuje zamknięcie odseparowanych od siebie pęcherzy powietrza, w objętości których następuje wzrost ciśnienia. We

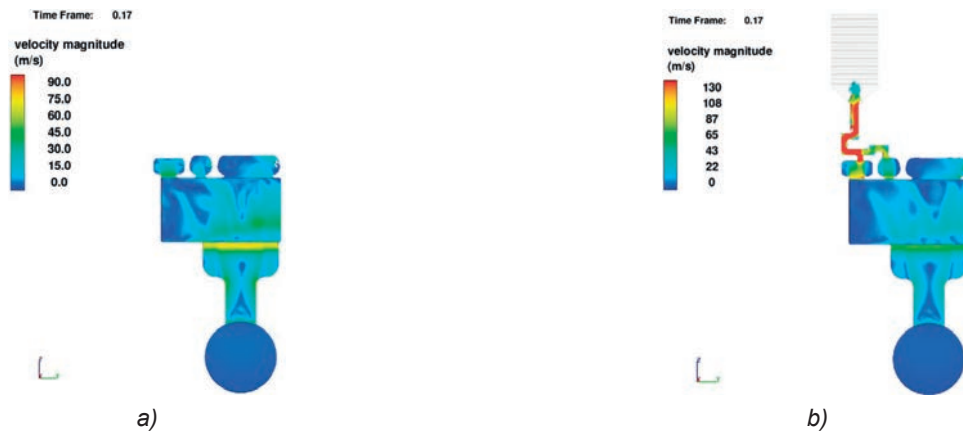
The influence of the size of the single mesh computational element is very important in determining calculation accuracy. Very fine dimensions of the mesh allow for the discretization of the three-dimensional object with considerable accuracy prolonging computation time. In the case of the analysis, computational grid size has been chosen according to the “rule of thumb”. This corresponds to the maintenance of the wall section detailing at least three computational elements. The analysis does not consider a comparative analysis of the effect of mesh density on the amount of closed air. The choice of mesh quality has been maintained in terms of ensuring optimum computing time.

The second variant of the simulation, shown in [Figure 2b](#), assumes the use of an injector insert, whose aim is to facilitate gas evacuation from the die cavity. [Figure 7](#) shows a visual representation of the velocity of molten metal flow in a die cavity at the instant when this cavity has been filled almost completely with metal in variant “a”. The velocities occurring in liquid metal are very similar.

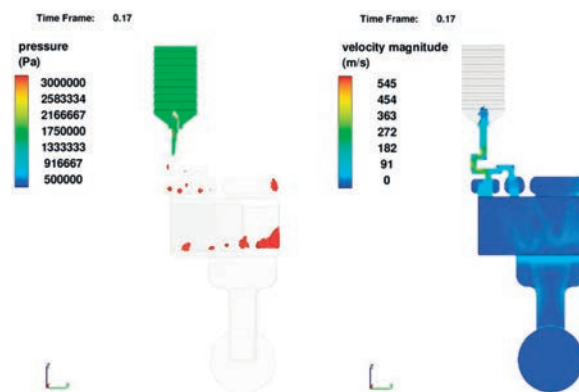
[Figure 8](#) shows a visual representation of the liquid metal velocity and gas pressure when the injector insert starts being filled with liquid metal.

As a result of variations in the cross-section forced by the injector insert design there is an increase in the velocity of liquid metal flow satisfying the stream continuity equation and a simultaneous drop of pressure in this metal. Visual representation of the gaseous phase behaviour in the last stage of the die cavity filling process depicted in [Figure 8](#) shows the occlusion of air bubbles separated from each other and inside their volume pressure increases. In the injector insert, the air sub-pressure can build up, and as a consequence





Rys. 7. Wizualizacja prędkości ciekłego metalu podczas wypełniania wnęki formy dla wariantu a i b  
 Fig. 7. Visual representation of the velocity of molten metal flow during filling of die cavity in variants “a” and “b”



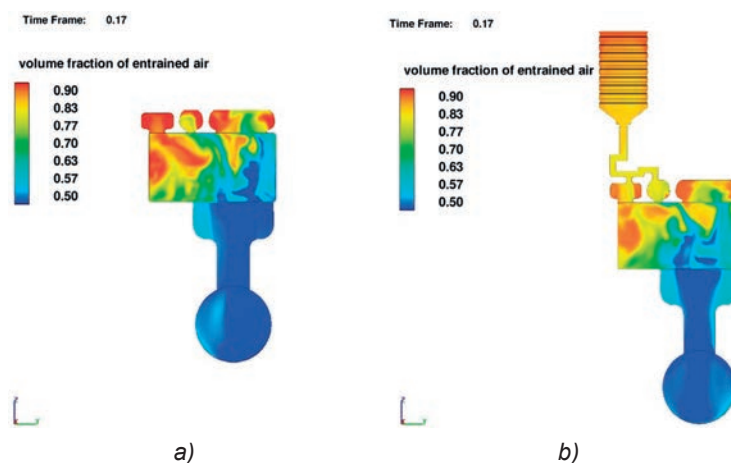
Rys. 8. Ciśnienie fazy gazowej we wnęce formy ciśnieniowej oraz prędkość przepływającego metalu  
 Fig. 8. Gas pressure in die cavity and metal flow velocity

wkładce inżektorowej może powstawać podciśnienie powietrza, czego efektem może być zasysanie go z formy przez kanał odpowietrzający inżektora.

Na rysunku 9 przedstawiono kryterialne porównanie powietrza zamykanego w metalu dla obu wariantów symulacji.

there will be suction of air from the die through the injector venting channel.

Figure 9 shows a criterial comparison of the air entrapment in metal for both simulation variants.



Rys. 9. Porównanie ilości zamykanego powietrza dla wariantów symulacji a i b  
 Fig. 9. The occluded air volume compared for simulation variants a and b

Analizując wyniki w postaci pól objętości metalu, w którym może nastąpić znaczne zamykanie powietrza w ciekłym metalu, można zauważyć, że zastosowanie wkładki inżektorowej spowodowało zmniejszenie okluzji gazowej występującej podczas przepływu ciekłego metalu przez wnękę formy ciśnieniowej. Potwierdza to wpływ zmiany wartości ciśnienia powietrza we wkładce inżektorowej.

Należy nadmienić, że testowy układ wlewowy został zaprojektowany w celu symulacji i analizy zachowania fazy gazowej. Dalsze prace będą ukierunkowane na optymalizację układu wlewowego w celu zmniejszenia ilości powietrza zamykanego w ciekłym metalu podczas procesu wypełniania wnęki formy ciśnieniowej.

## 5. Wnioski

Wykorzystanie programów CAD, wspomagających pracę inżyniera odlewnika, jest nieocenione dla odlewni starającej się osiągnąć bardzo wysoki poziom wydajności oraz jakości produkowanych odlewów. Analiza symulacyjna procesu odlewania ciśnieniowego umożliwia wstępną ocenę koncepcji układu wlewowego pod kątem optymalnego przepływu ciekłego metalu pod wpływem przemieszczania się tłoka prasującego. Uzyskane wyniki pokazały, że zastosowanie wkładki inżektorowej ograniczyło ilość powietrza, które może zostać zamknięte wewnątrz ciekłego metalu. Wprowadzenie do programu symulacyjnego danych, takich jak poziom wypełnienia komory oraz poszczególne prędkości dla faz procesu, umożliwiają na bieżąco korygowanie warunków procesu. Ocena wpływu takich elementów formy ciśnieniowej jak wkładka inżektorowa w przestrzeni wirtualnej na jakość wykonywanych odlewów pozwala na optymalizację projektu konstrukcji formy ciśnieniowej. Analiza projektu oraz optymalizacja przekrojów układu wlewowego i odpowietrzającego formę umożliwia podnoszenie wydajności pracy urządzeń, przekładając się tym samym na zyski ekonomiczne.

## Podziękowanie

Praca została wykonana w ramach projektu „Opracowanie technologii i uruchomienie eksportowej produkcji obudowy pompy olejowej do Mercedesa klasy C”.

## Literatura/References

1. Sobczak, J.J., Balcer, E., Kryczek, A. (2015). Prezentacja „Sytuacja odlewnictwa światowego i krajowego, z uwzględnieniem odlewnictwa ciśnieniowego”. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Innowacje w odlewnictwie ciśnieniowym”, Teresin, 6–8 maja 2015.
2. Fajkiel, A., Walczak, W. (2003). Poprawa organizacji pracy na stanowisku odlewania ciśnieniowego poprzez zastosowanie urządzeń peryferyjnych. *Archiwum Odlewnictwa*, 3(8), 61–68.

Analyzing the results represented by the fields of metal volume in which a high degree of the air entrapment can occur, it can be seen that the use of an injector insert has reduced the gas occlusion during liquid metal flow through the die cavity. This is confirmed by the air pressure values changing in the injector insert.

It is important to note that the test gating system has been designed in such a way as to simulate and analyze the behaviour of the gaseous phase. The aim of further work will be optimization of this system to reduce the air volume entrapped by liquid metal during the process of die cavity filling.

## 5. Conclusions

CAD programs as a tool supporting the work of a foundry engineer are invaluable for foundries trying to achieve a very high level of performance and quality of produced castings. Simulation analysis of the pressure die casting process enables preliminary assessment of the concept of a gating system for the optimal flow of molten metal under the effect of plunger movement. The results show that the use of an injector insert reduce the air volume that can remain entrapped in molten metal. The introduction into the simulation program of data such as the level of chamber filling and different velocities at individual process stages allow for ongoing adjustment of process conditions. Evaluation in a virtual space of the impact of such die elements as the injector insert on casting quality allows further optimization of the die design. Analysis of the design and optimization of the cross-section of the gating and venting system increases the productivity of equipment with direct translation into economic benefits.

## Acknowledgement

The results presented in this publication were partially based on research conducted under project “Development of the technology and start-up of export production of the oil pump housing to the Mercedes-Benz C-class car”.

3. Białobrzęski, A. (1992). *Odlewnictwo ciśnieniowe*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
4. Nouri-Borujerdi, A., Goldak, J.A. (2004). Modeling of Air Venting in Pressure Die Casting Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(3), 577–581.
5. Stuczyński, T., Wężyk, W., Zamkotowicz, Z. (1997). Jakość ciekłych stopów aluminium. Metody jej kontroli i poprawy. *Krzepnięcie Metali i Stopów*, (33), 95–104.
6. Yun, W., Li, H.T., Zhongyun, F. (2012). Oxidation of Aluminium Alloy Melts and Inoculation by Oxide Particles. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, DOI 10.1007/s12666-012-0194-x.
7. Fajkiel, A., Reguła, T., Saja, K., Dudek, P. (2009). Wytyczne dotyczące konstrukcji wybranych elementów układu wlewowego, [w:] *Innowacje w odlewnictwie ciśnieniowym. Część II*. Kraków: Instytut Odlewnictwa, 17–26.
8. Fajkiel, A., Saja, K., Dudek, P., Syrowy, M. (2006). Weryfikacja konstrukcji odlewu i formy ciśnieniowej okucia okiennego na podstawie obliczeń numerycznych. *Odlewnictwo – Nauka i Praktyka*, 8(5–6), 101–109.
9. Iwata, Y., Dong, S., Sugiyama, Y., Iwahori, H. (2012). Compression Behaviour of Entrapped Gas in High Pressure Die-casting. *Materials Transactions*, 53(3), 483–488.
10. Hirt, C.W., Burkhudarov, M.R. (2013). Void Regions and Bubble Models in Flow-3D. *Flow Science Report 01-13*.
11. Fajkiel, A. (2002). Dobór parametrów technologicznych i warunków eksploatacji form i części szybko zużywających się, [w:] *Wybrane zagadnienia technologii odlewania ciśnieniowego*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.

