

Analiza symulacyjna przepływu ciekłego metalu przez innowacyjną komorę reakcyjną w technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego i jej optymalizacja

Simulation analysis of liquid metal flow through an innovative reaction chamber (and its shape optimization) used in ductile iron production technology

Marcin Małysza^{1*}  , Zbigniew Stefański¹ 

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

¹ Łukasiewicz Reserch Network – Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

Corresponding author: marcin.malysza@iod.krakow.pl

Received: 19.05.2017. Accepted in revised form: 31.05.2019.

© 2019 ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2019.04

Streszczenie

Odlewy z żeliwa sferoidalnego znajdują szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu ze względu na swoje właściwości mechaniczne. Wytwarzanie tego gatunku materiału wymaga utrzymania reżimu technologicznego oraz czystości materiału wyjściowego. Z tego powodu stale rozwijane są metody wytwarzania oraz kontroli tego materiału. W niniejszej publikacji przedstawiona została nowa metoda sferoidyzacji i modyfikacji żeliwa w formie. Innowacją tej metody jest zastosowanie specjalnie opracowanej konstrukcji komory, w której zachodzi reakcja uszlachetniania żeliwa. W artykule przedstawione zostały przeprowadzone badania symulacyjne, mające na celu analizę profilu przepływającego ciekłego metalu w zadanej konstrukcji. Następnie wprowadzone zostały zmiany geometrii komory, celem optymalizacji jej kształtu oraz powtórnie wykonano analizę w tożsamych warunkach brzegowych. Wynikiem badań jest opracowanie konstrukcji, która zapewni odpowiedni charakter przepływu pozwalający na uzyskanie dobrej jakości żeliwa i odlewów z żeliwa sferoidalnego w formie odlewniczej.

Słowa kluczowe: żeliwo sferoidalne, modyfikacja i sferoidyzacja żeliwa w formie, symulacja komputerowa przepływu metalu

Abstract

Ductile iron castings are widely used in many industrial branches because of their mechanical properties. The production process of such a grade of cast iron requires the maintenance of the technological regime and the purity of initial charge material. For this reason, methods of manufacturing and controlling materials are constantly being developed. This publication presents a new method of modification and spheroidization in the mould. The innovation of this method is the use of specially developed construction of the reaction chamber. Simulation studies were conducted to analyze the flow profile of liquid metal in the developed shapes of the chamber. Subsequently, the changes in the geometry of the chamber were made and analyzed under the same boundary conditions. The result of the study is the designation of a structure that will provide the appropriate flow characteristics to achieve good quality castings.

Keywords: computer simulation, modification and spheroidization in the form, ductile iron, casting technology

1. Wstęp

Zastosowanie odlewów z żeliwa sferoidalnego w wielu branżach odnotowuje stałą tendencję wzrostową w światowej i krajowej produkcji [1]. Wynika to z wyso-

1. Introduction

The use of ductile iron castings in many industries has a constant growth in world and domestic production [1]. This is due to the high desirable mechanical

kich właściwości mechanicznych i użytkowych tego rodzaju żeliwa, preferujących go do stosowania na odlewy o wysokich wymaganych właściwościach, niezbędnych w wielu dziedzinach dla wyrobów użytkowych, elementów konstrukcji itp. [2].

Ogólnie, żeliwo sferoidalne otrzymuje się w wyniku uszlachetniania wytopionego w piecach żeliwa wyjściowego, poprzez proces sferoidyzacji i modyfikacji, specjalnie przygotowanymi zaprawami, zawierającymi głównie magnez jako podstawowy pierwiastek sferoidyzujący [3,4].

Znanych jest kilka metod wprowadzania dodatków sferoidyzujących i modyfikujących do ciekłego, wyjściowego żeliwa, pozwalających na wytworzenie tego rodzaju uszlachetnionego tworzywa. Przykładowo, do ciekłego metalu w kadzi, wprowadzany jest specjalny stalowy przewód elastyczny, zawierający niezbędne dodatki. Inna znana metoda „sandwich” polega na wprowadzaniu do kadzi odpowiednich zapraw, a następnie zalaniu ich ciekłym metalem. Kolejna znana metoda „in mould” polega na zastosowaniu sferoidyzatora umieszczonego wewnątrz formy odlewniczej, w układzie wlewowym [5,6]. Jak zwykle w takich przypadkach wymienione metody mają pewne zalety i wady.

W Instytucie Odlewnictwa w Krakowie została opracowana, a następnie opatentowana nowa, innowacyjna na skalę światową metoda sferoidyzacji i modyfikacji żeliwa. W metodzie tej proces sferoidyzacji zachodzi bezpośrednio w formie odlewniczej, w specjalnej komorze reakcyjnej (reaktorze) [7]. Metoda ta obecnie rozwijana jest dzięki pracom badawczym realizowanym w ramach projektu INNOTECH-K3/IN354227695/NCBR/14. Generalnie polega ona na tym, że odpowiednio skonstruowany i wykonany reaktor jest umieszczany we wnęce formy, z chwilą składania dwóch połówek formy, podobnie jak typowy rdzeń formierski. W reaktorze umieszczony jest sferoidyzator, modyfikator oraz filtr do filtracji metalu. W czasie zalewania formy ciekłym żelivem o wymaganym składzie chemicznym, w komorze zachodzą jednocześnie procesy sferoidyzacji, modyfikacji oraz filtracji żeliwa, przepływającego układem wlewowym przez komorę i wpływającego następnie do wnętrza odlewniczej [8].

Nowa metoda wykonywania odlewów z żeliwa sferoidalnego została opracowana dla dwóch stosowanych podstawowych wariantów technologicznych wykonywania form odlewniczych, to jest z poziomym i pionowym podziałem, co pokazano schematycznie na rysunku 1.

W opracowanym procesie istotne są: wytopienie żeliwa wyjściowego o składzie zbliżonym do przedstawionego w tabeli 1, osiągnięcie optymalnej temperatury zalewania oraz zalanie ciekłym metalem formy, gdzie w układzie wlewowym znajduje się przestrzeń, w której umieszczono reaktor.

and utility properties of this type of cast iron, which is preferred for use as casts with high required properties, essential in many areas for utility products, construction elements, etc. [2].

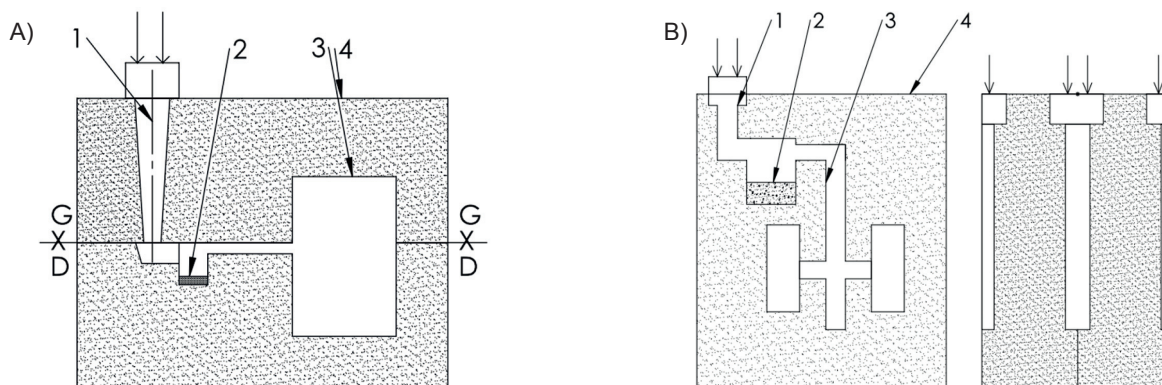
In general the production of ductile cast iron includes the melting of the charge of initial chemical composition and addition of special modifying and nodulizing elements containing magnesium as the basic element [3,4].

There are several known methods of introducing the modifying and nodulizing elements to the initial liquid metal. For example, a special elastic wire containing necessary additives is fed into the liquid metal. Another known method is the Sandwich method where the special additives are placed on the bottom of the ladle and covered with metal scrap. Then the liquid metal of initial chemical composition is poured from the furnace and the temperature of liquid metal melts the covering metal scrap. Another method is the In-mould method where the modifying and nodulizing elements are placed in the mould along with the gating system [5,6].

At the Foundry Research Institute in Cracow an innovative method of spheroidization of cast iron was developed and patented. The modification and nodulation process occurs in the special in-mould cavity called a reaction chamber, unlike in the traditional In-mould method where the additional elements are placed directly in the mould cavity [7]. This method is currently being developed through research work carried out within the project INNOTECH-K3/IN354227695/NCBR/14. The method consists of the moulding process of the casting pattern with the reaction chamber. The two mould halves are assembled with the chamber as if it was a typical core. The modifying and nodulizing elements are placed in the special cavity of the reaction chamber. Additionally the chamber has a special space for the filter. During the filling of the mould with the cast iron of the initial chemical composition, the modification, nodulization and filtration process occurs simultaneously [8].

The method was developed for two basic technological variants of filling process, with the horizontal and vertical parting line. Basic filling schematics are presented in Figure 1.

In the developed process, the characteristic steps are: melting of the cast iron with a initial chemical composition shown in Table 1, achieving the optimal pouring temperature and pouring of the liquid metal into the mould where the gating system includes a reaction chamber.



Rys. 1. Ogólny schemat procesu dla: poziomej (A) i (B) – pionowej płaszczyźnie podziału formy
 1 – wlew doprowadzający, 2 – komora reakcyjna, 3 – wnęka formy, 4 – forma
 Fig. 1. General process diagram for: horizontal (A) and (B) vertical position
 1 – gating system, 2 – reaction chamber, 3 – mould cavity, 4 – mould

Tabela 1. Przykładowy skład chemiczny wyjściowego żeliwa, % wag.

Table 1. Exemplary chemical composition of initial cast iron, wt. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg
3,98	2,12	0,27	0,035	0,018	0,03	0,05	–

Bardzo istotnym jest zapewnienie homogeniczności ciekłego metalu w całej objętości formy odlewniczej. W przypadku proponowanego rozwiązania jednym z podstawowych zagadnień było odpowiednie zaprojektowanie układu wlewowego, który umożliwi wprowadzenie do wnętrza formy ciekłego metalu, o wysokiej jednorodności, zapewniając tym samym otrzymanie wysokiej jakości żeliwa sferoidalnego. Szczególnie istotnym było tutaj prawidłowe rozwiązanie konstrukcji obudowy komory reakcyjnej, umożliwiającej optymalne parametry przepływu ciekłego metalu, jego dobre zawirowanie wpływające na rozpuszczenie zapraw (sferoidyzatora i modyfikatora), a zarazem jednorodność ciekłego metalu. Ponadto konstrukcja obudowy musi być odpowiednio wytrzymała, aby w warunkach zalewania w wysokiej temperaturze – to jest około 1450°C – wytrzymać napór ciekłego metalu przez około 30 s.

Opracowany nowy sposób sferoidyzacji jest zupełnie inny niż stosowane dotychczas metody PE i 2PE (drutowa, w kadzi), w których homogenizacja ciekłego metalu następuje w kadzi odlewniczej [6]. Podstawowym celem badań symulacyjnych było umożliwienie wskazania pewnych nieprawidłowości w konstrukcji komory, pozwalających na dokonanie optymalizacji jej kształtów. Przedstawiona w dalszej części artykułu analiza dotyczyła przeprowadzonych badań symulacyjnych przepływu ciekłego metalu w komorze, gdzie umieszczone zostały dodatki stopowe w postaci zapraw.

W niniejszej publikacji opisane zostały tylko ogólne zasady nowego procesu celem ochrony własności intelektualnej kolejnych rozwiązań opracowanych podczas realizacji projektu.

It is very important to ensure the homogeneity of the liquid metal in the mould. In the case of the proposed solution, one of the basic issues is the proper design of a gating system which should allow for the laminar filling and additionally the fine homogeneity of the liquid metal. A very important element was the correct design of the reaction chamber, which allows for achieving optimal parameters of the liquid metal flow and mixing, which affects the dissolution of alloying elements. The design of reaction chamber should be able to withstand high pressure of liquid metal and high temperature – near 1450°C for at least 30 s.

The developed method is completely different from the wire method (PE and 2PE) where the whole modification process takes place in the ladle [6]. The primary objective of the simulations was to indicate irregularity in the designed structure of the reaction chamber and optimize the shape. The analysis presented in the next part of the article concerns the conducted simulation tests of flow of the liquid metal in the reaction chamber, where alloying additives are placed.

This publication describes only the general principles of the new process in order to protect the intellectual property of further solutions developed during project implementation.

2. Badania symulacyjne

Rozwój programów stosowanych do symulacji różnych procesów fizycznych pozwala na prowadzenie coraz bardziej dokładnych wirtualnych eksperymentów. Posiadając odpowiednie dane opisujące stop i materiał formy, można zdefiniować warunki brzegowe, które w bardzo przybliżonym stopniu pozwalają na analizę zjawisk związanych z procesem odlewania i krzepnięcia [8,9,10]. W przypadku podjętych prac badawczych analizie numerycznej poddano zjawisko przepływu ciekłego metalu w układzie wlewowym wnęki formy, który zawiera specjalnie zaprojektowaną komorę, w której następuje proces sferoidyzacji i modyfikacji grafityzującej. Podstawą matematyczną wykorzystywanego algorytmu jest metoda FAVOR, która pozwala na interpretację geometrii przez zastosowanie metody objętości skończonych. Zjawisko przepływu wyznaczone jest za pomocą równań przepływu cieczy lepkiej, newtonowskiej, nieściśliwej. Uogólniony algorytm został przedstawiony za pomocą równań (1) i (2) [11,12]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V}(Au \cdot \nabla) \cdot u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho V} (\nabla A) \cdot (\mu \nabla) u + g \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{V}(Au \cdot \nabla) \cdot H = \frac{1}{\rho V} (\nabla A) \cdot (k \nabla T) \quad (2)$$

w których:

where:

$$Au = (A_x u_x, A_y u_y, A_z u_z), (\nabla A) = \left(\frac{\partial}{\partial x} A_x, \frac{\partial}{\partial y} A_y, \frac{\partial}{\partial z} A_z \right),$$

$$H = \int C(T) dT + (1 - f_s) \cdot L$$

gdzie:

where:

A – przestrzeń otwarta oraz (x, y, z) kierunek przepływu

A – open space and (x, y, z) direction of flow

V – ułamek objętości otwartej

V – open volume fraction,

ρ – gęstość, $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

ρ – density, $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$

p – ciśnienie, Pa

p – pressure, Pa

u – składowa prędkości

u – velocity component,

μ – lepkość dynamiczna, $(\text{Pa} \cdot \text{s})$

μ – dynamic viscosity, $(\text{Pa} \cdot \text{s})$

g – przyspieszenie ziemskie, $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$

g – gravity component, $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$

H – entalpia, $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$

H – enthalpy, $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$

T – temperatura ciekłego metalu, $^{\circ}\text{C}$

T – initial temperature of the liquid metal, $^{\circ}\text{C}$

f_s – ułamek fazy zakrzepniętej

f_s – solid fraction,

L – utajone ciepło przemiany, ($J \cdot kg^{-1}$)

C – ciepło właściwe, ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

k – przewodność cieplna, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

Od strony materiału formy oraz komory reakcyjnej równanie przyjmuje postać:

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_m V_c} (\nabla A_c) \cdot (k_m \nabla T_m) \quad (3)$$

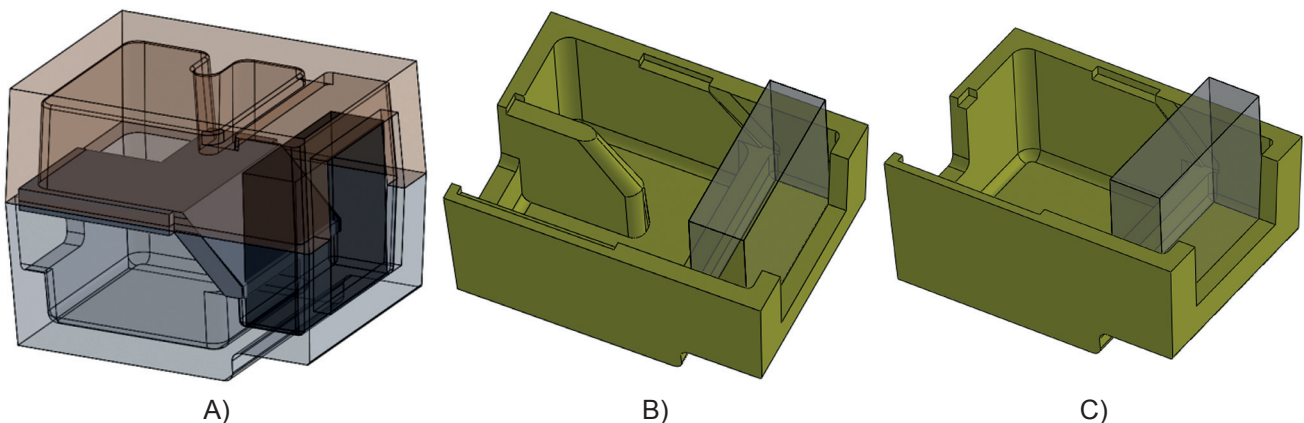
W przypadku równania (3), m przyjmują dane materiałowe dla formy oraz komory. Wartość strumienia ciepła q przenikającego od ciekłego metalu rozpatrywana jest w oparciu o równanie (4)

$$q = h \cdot (T - T_m) \quad (4)$$

gdzie h definiowane jest jako współczynnik przewodnictwa cieplnego.

3. Analiza numeryczna – wirtualny eksperyment i dyskusja wyników

W pierwszej serii symulacji analizie poddane zostały dwa warianty geometrii komory reakcyjnej. Ze względu na uwarunkowania patentowe, na [rysunku 2](#) przedstawiony został jedynie ogólny kształt komory bez podania wymiarów. Dodatkowo przedstawione zostały dwie analizowane konstrukcje zawierające kształty wpływające na charakter przepływu.



Rys. 2. Geometria komory reakcyjnej: A) złożenie komory, górna i dolna część oraz grodz oddzielająca połowy, B) wersja komory z przegrodą, C) bez przegrody

Fig. 2. Reaction chamber geometry: A) chamber assembly, upper and lower part and bulkhead, B) chamber with baffle, C) without baffle

Na [rysunku 3](#) przedstawiony został układ testowy odlewania w układzie poziomego podziału formy.

L – latent heat, ($J \cdot kg^{-1}$)

C – specific heat, ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

k – thermal conductivity, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

The numerical equations including the material of the mould and the reaction chamber's takes the form:

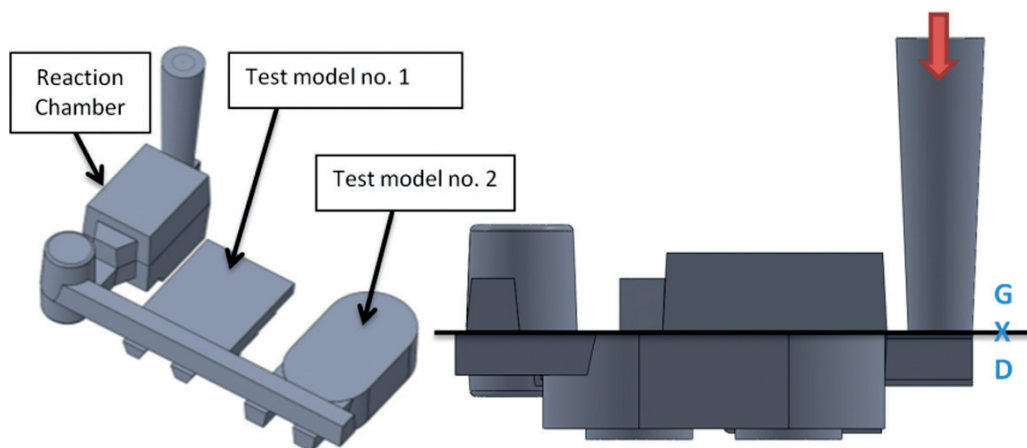
In the Equation (3), the m is the properties of the mould and the reaction chamber material. The value of heat flux q from the liquid metal is based in the Equation (4):

where, h is defined as the heat transfer coefficient value.

3. Numerical analysis – virtual experiment setup and discussion of results

The first series of simulation iterations was conducted on two reaction chamber shapes. Due to patent conditions [Figure 2](#) shows the overall shape of the chamber without dimensions.

In [Figure 3](#) the testing assembly with horizontal alignment is presented, which is based on the real laboratory testing model assembly.



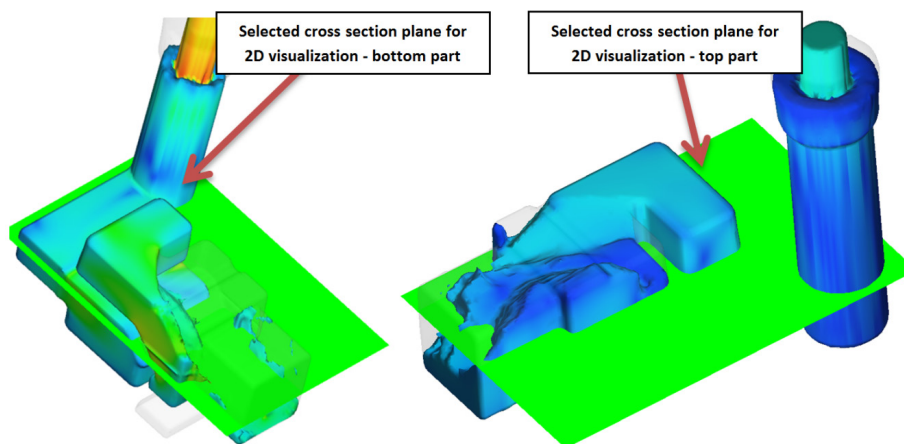
Rys. 3. Układ testowy w układzie poziomego podziału formy
 Fig. 3. Simulation assembly in the horizontal parting line

W układzie testowym poza układem wlewowym zawierającym elementy sprzyjające osiągnięciu optymalnych warunków tworzenia się żeliwa sferoidalnego, dołączony został model schodkowy nr 1 oraz model nr 2. Założone zostały warunki brzegowe uwzględniające parametry fizykochemiczne w funkcji temperatury dla stopu o zadanym składzie chemicznym, właściwości masy formierskiej oraz masy, z której wykonana została komora. Parametry symulacji uwzględniają:

- stałe ciśnienie metalostatyczne doprowadzenia ciekłego metalu od strony wlewu głównego $p = 1,085e + 05$ Pa,
- dane reologiczne stopu GJL150 i $T_{zal} = 1280^{\circ}\text{C}$,
- warunki izotermiczne procesu – zmiany temperatury w tej części analizy nie są brane pod uwagę, a jedynie prędkość oraz charakter przepływu ciekłego metalu przez obszar komory reakcyjnej.

The test for horizontal parting line mould includes, besides the gating system and reaction chamber, two test models used for the evaluation of the spheroidization process in the laboratory trials. The set of the boundary conditions takes into account the physicochemical parameters of the alloy and moulding materials as a function of temperature. The simulation setup also includes:

- the inlet pressure on the top of the sprue,
- full viscosity data of the GJL150 alloy with the pouring temperature $T_{in} = 1280^{\circ}\text{C}$,
- isothermal process conditions – temperature changes in this part of the analysis are not taken into account, and only the velocity and the nature of the flow of liquid metal through the reaction chamber were considered.



Rys. 4. Płaszczyzna rzutowania dla wizualizacji 2D przepływu w obszarze komory reakcyjnej
 Fig. 4. Projection plane for 2D flow visualization in the area of the reaction chamber

Wyniki symulacji opracowano w postaci wizualizacji linii oraz wektorów przepływu. Wyznaczona została płaszczyzna rzutowania wyników w celu przedstawienia ich w układzie 2D (rys. 4).

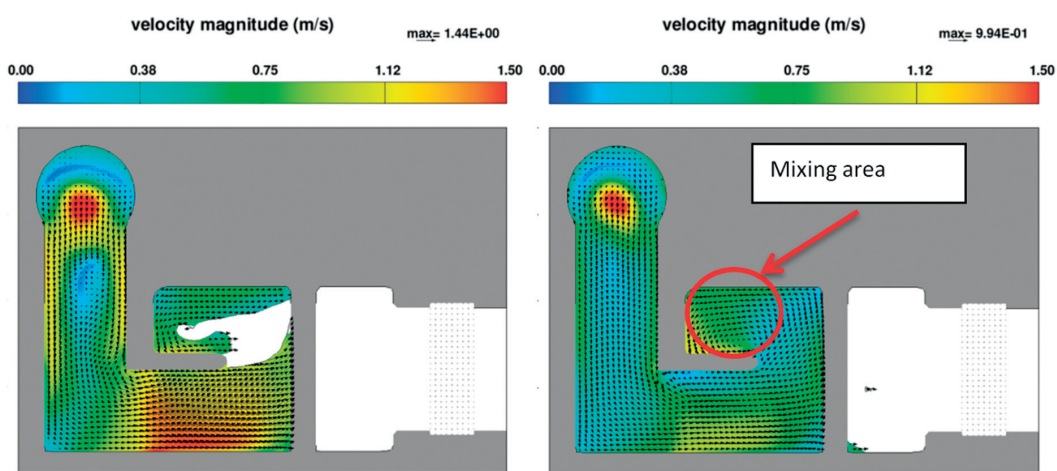
3.1. Symulacja – wariant I

W wariantcie pierwszym symulacji została poddana geometria komory reakcyjnej posiadająca przegrodę (rys. 2B). W celu stworzenia warunków umożliwiających porównanie przepływu we wszystkich prowadzonych analizach warunki brzegowe są takie same. Na rysunku 5 przedstawiona została wizualizacja wyników przepływu.

The results of the simulation are presented in the form of visualization of the streamlines and vectors. On the selected projection planes the 2D results are presented (Fig. 4).

3.1. Simulation – setup I

In the simulation setup I the chamber with the baffle was analyzed (Fig. 2B). For the evaluation of all proposed geometries the boundary conditions for every iteration are similar. In Figure 5 the visualization of the velocity results in 2D are presented.



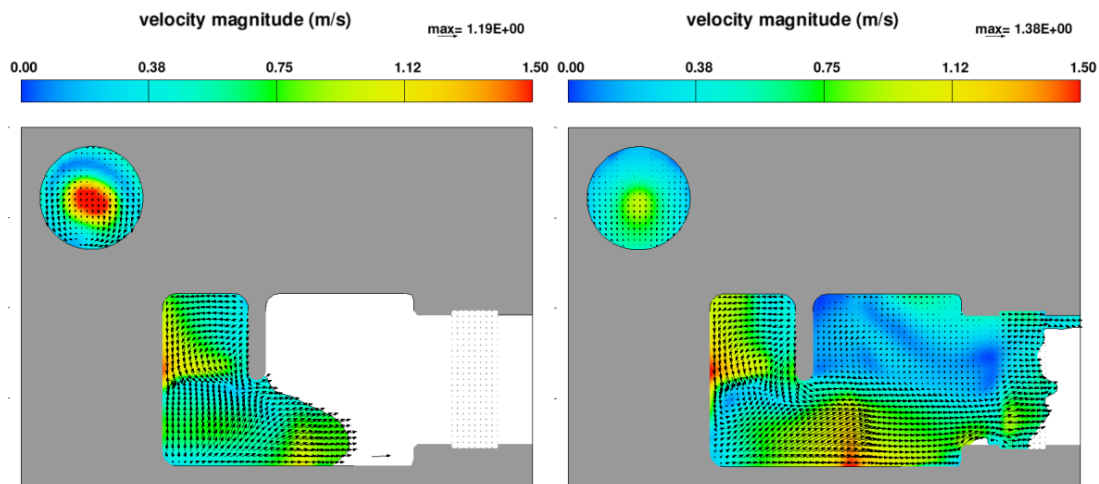
Rys. 5. Wizualizacja prędkości przepływu w rzucie 2D – dolna część komory w $t = 0,5$ s i $t = 0,7$ s
Fig. 5. Visualization of flow velocity in 2D projection – lower part of chamber at $t = 0.5$ s and $t = 0.7$ s

W momencie wpłynięcia ciekłego metalu do objętości wnętrza komory reakcyjnej front strugi układu się wzdłuż bocznej części komory. Jest to naturalna droga, którą musi obrać ciekły metal ze względu na geometrię układu. Następnie struga jest zahamowana przez ścianę i po odbiciu skierowana w stronę przeciwną, w kierunku okna umożliwiającego transport ciekłego metalu do górnej komory, co przedstawia rysunek 6. W tym momencie metal zaczyna wirować w obszarze przegrody.

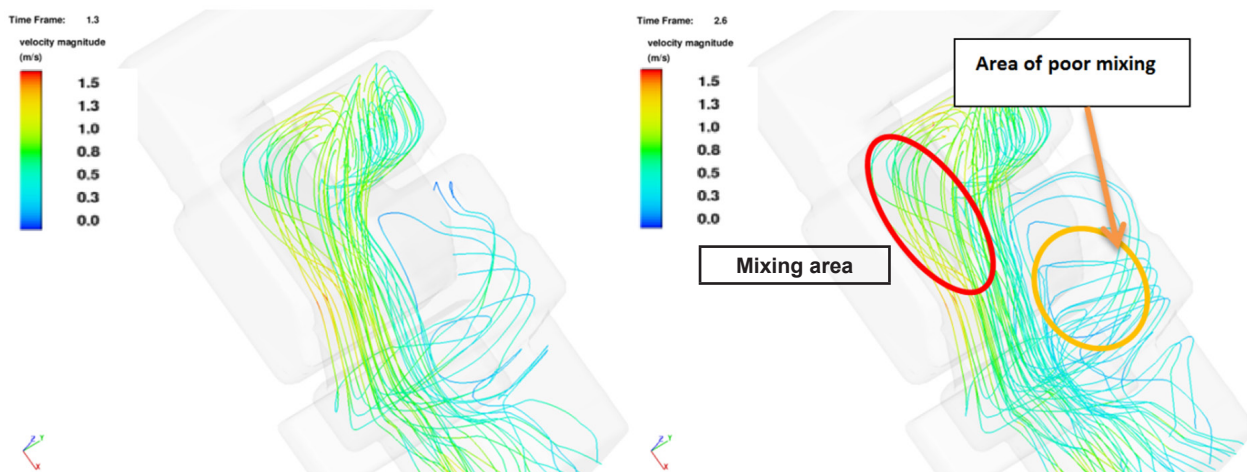
Wizualizacja przepływu pozwala zauważyć, że pierwsza porcja ciekłego metalu przepływa przez wnękę przeznaczoną na sferoidyzator i modyfikator, kieruje się w stronę filtra. Dopiero większa porcja ciekłego metalu w górnej części komory powoduje jego spiętrzenie się na filtrze i cofanie, tworząc efekt mieszania w górnej komorze. Ze względu na zastosowanie grodzi oddzielającej górną i dolną komorę, która dodatkowo w połowie jest łamana, niemożliwe jest dokładne przedstawienie przepływu w wybranej warstwie 2D, dlatego na rysunku 7 zaprezentowana została dodatkowo wizualizacja linii przepływu.

The moment of entering the liquid metal into the reaction chamber, the front of the liquid metal stream is positioned along the side of the chamber. This is the natural way of liquid metal flow because of the geometry of the system. The stream is then braked through the wall and, after reflection, facing the opposite towards the window allowing the liquid metal to be transported to the upper chamber as shown in Figure 6. At this point, the metal begins to rotate within the baffle area.

The visualization of the liquid metal flow shows that the first portion goes through the cavity where the spheroidizer and the modifier is placed and then flows towards the filter. Only a larger portion of the liquid metal in the upper part of the chamber causes it to pile up on the filter and retract, creating a mixing effect in the upper chamber. Due to the use of a bulkhead that separates the upper and lower compartments, which is further broken in half, it is impossible to accurately represent the flow in the selected 2D layer. Figure 7 also shows the visualization of the streamlines.



Rys. 6. Wizualizacja prędkości przepływu w rzucie 2D – górna część komory w $t = 0,7$ s i $t = 1,2$ s
 Fig. 6. Visualization of flow velocity in 2D projection – upper part of chamber $t = 0.7$ s and 1.2 s



Rys. 7. Wizualizacja prędkości w postaci linii przepływu w rzucie 3D – górna część komory w $t = 1,3$ s i $t = 2,6$ s
 Fig. 7. The visualization of streamlines in the 3D view – upper part of chamber at $t = 1.3$ s and $t = 2.6$ s

3.2. Symulacja – wariant II

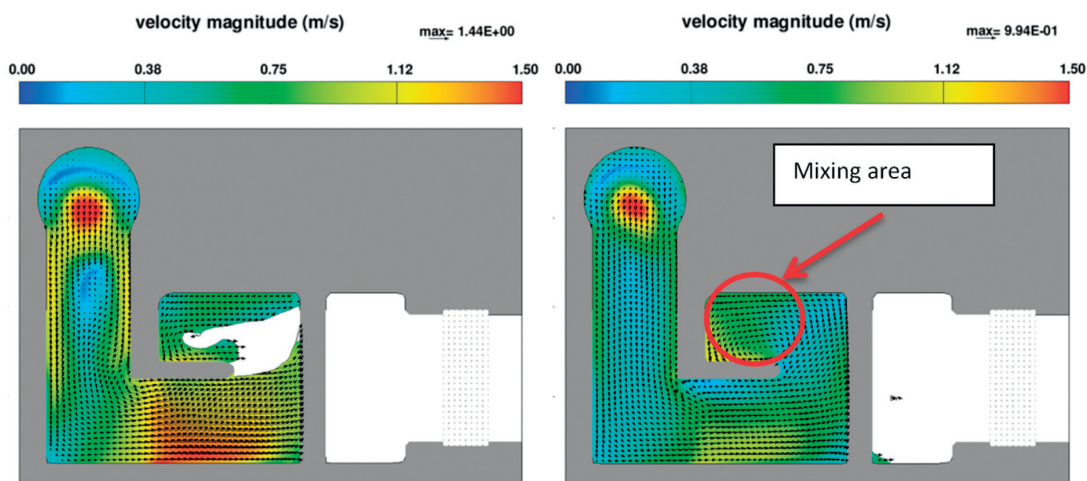
W drugim wariantcie symulacji analizie została poddana komora reakcyjna bez przegrody (rys. 2C). Warunki brzegowe zostały przyjęte podobnie jak w przypadku poprzedniego wariantu. Wyniki symulacji w postaci wizualizacji przedstawione zostały na rysunku 8.

Początkowa faza wypełniania objętości komory reakcyjnej bez przegrody jest zbliżona do charakteru wypełniania komory dla poprzedniego kształtu. Po odbiciu strugi i jej powrotu w stronę przeciwną następuje mieszanie w całej objętości dolnej części komory. Takie warunki przepływu zapewniają lepsze rozpuszczanie się sferoidyzatora i modyfikatora, jak i ujednorodnioną temperaturę ciekłego metalu. Przedstawiona wizualizacja wyników pozwala zauważyć, że charakter przepływu w górnej części komory reakcyjnej (bez przegrody w dolnej części) jest bardzo zbliżony do wariantu I.

3.2. Simulation – setup II

The second simulation was run for the reaction chamber without the baffle (Fig. 2C). The boundary conditions were adopted the same as in the previous variant. The simulation results in the form of visualization are shown in Figure 8.

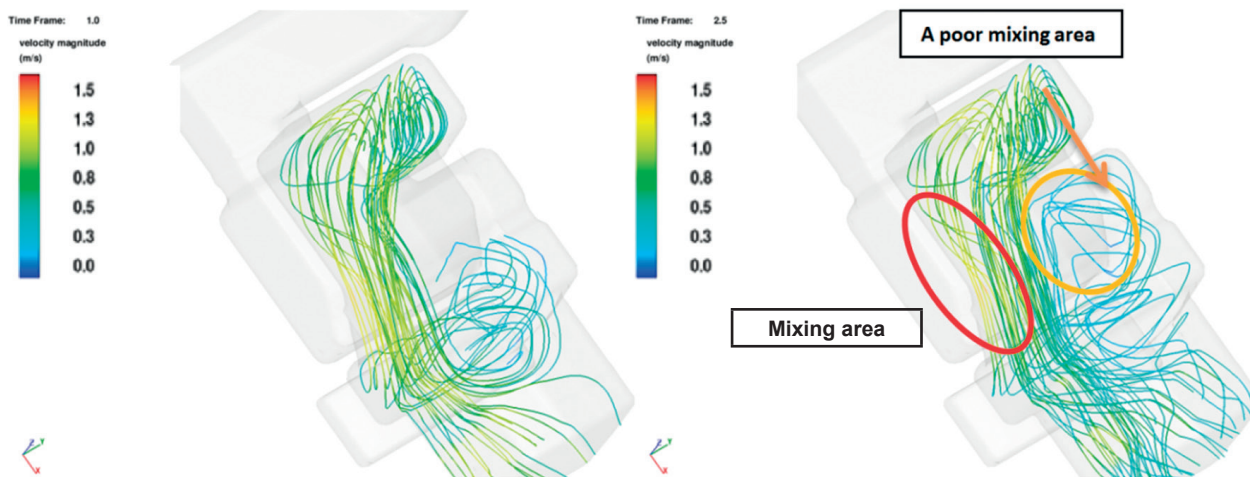
The initial phase of the filling of the reaction chamber without a baffle is very similar to the nature of the filling chamber of the previous shape. After the stream hits the wall and is reflected back it starts mixing the whole volume in the lower part of the chamber. Such flow conditions provide better dissolution of the spheroidizer and modifier as well as more uniform temperature of the liquid metal. The visualization of the results shows that the nature of the flow in the upper part of the reaction chamber (without the baffle at the bottom) is very close to that of variant I. The range of velocity present



Rys. 8. Wizualizacja prędkości przepływu w rzucie 2D – dolna część komory w $t = 0,5$ s i $t = 0,7$ s
 Fig. 8. Visualization of flow velocity in 2D projection – lower part of chamber at $t = 0.5$ s and $t = 0.7$ s

Zwiększa się nieco zakres prędkości występujący w objętości ciekłego metalu. W tym przypadku również występuje strefa częściowo odizolowanego mieszania oraz pewna objętość ciekłego metalu, która kieruje się bezpośrednio w stronę filtra. Na rysunku 9 przedstawiony został charakter przepływu w postaci linii.

in the volume of liquid metal is slightly increased. In this case, there is also a zone of partially isolated mixing and a certain volume of liquid metal that directs directly towards the filter. Figure 9 shows the streamlines in the top chamber.



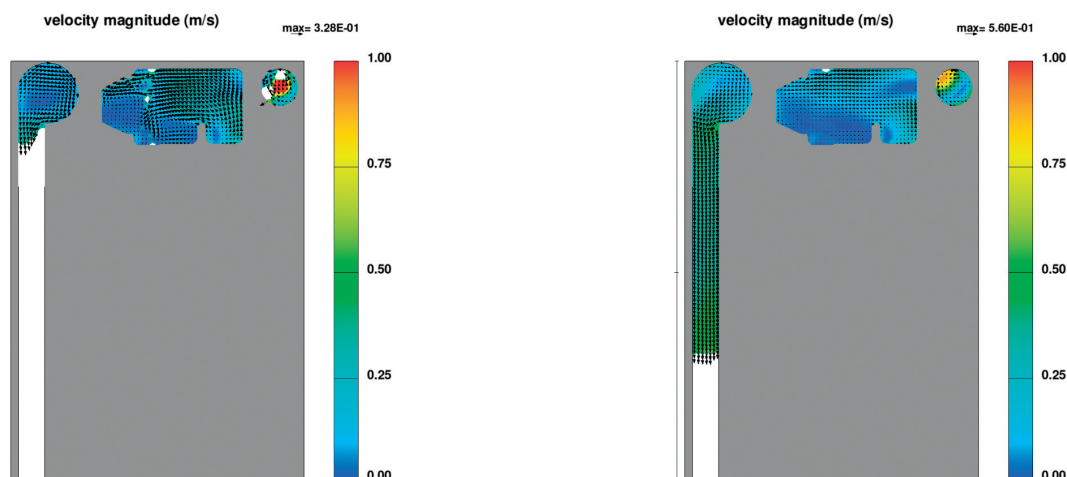
Rys. 9. Wizualizacja prędkości przepływu w rzucie 3D – górna część komory, wariant II
 Fig. 9. The visualization of streamlines in the 3D view – upper part of chamber $t = 1.3$ s and $t = 2.6$ s

Projekt układu wlewowego zawiera dodatkowy element w postaci miksera, którego zadaniem jest dodatkowe mieszanie ciekłego metalu. Zasadniczo przepływ w jego objętości dla analizowanych przypadków jest zbliżony. Wizualizacja przepływu ciekłego metalu w objętości miksera przedstawiona została na rysunku 10.

The design of the gating system includes an additional element, a mixer in the mould. The mixer is responsible for additional mixing of the liquid metal. In general, the flow in the volume of the analyzed cases is similar. The visualization of liquid metal flow in the mixer volume is shown in Figure 10.

Zaznaczone wektory kierunku pozwalają zauważyć, że wymuszony kształtem ruch ciekłego metalu powoduje wirowanie przed wypełnieniem wlewu doprowadzającego. Jest to drugi obszar w układzie wlewowym, gdzie

The observed vectors show that the movement is forced by the shape of the mixer. The liquid metal starts mixing before filling the runner. This is the second area in the gating system, where liquid metal is



Rys. 10. Wizualizacja przepływu ciekłego metalu w obszarze miksera
 Fig. 10. Visualization of liquid metal flow in the mixer area

wymuszone wirowanie metalu pozwala na jego ujednorodnienie. Takie warunki są pożądane w celu uzyskania odpowiedniej, końcowej struktury w odlewie.

Porównując obie geometrie, można zauważyć, że zastosowanie przegrody w dolnej połowie komory powoduje ograniczenie możliwości mieszania oraz obniżenie prędkości ciekłego metalu. Modyfikacja kształtu komory przez usunięcie przegrody powoduje zwiększenie się obszaru mieszania i umożliwia wizualnie lepsze mieszanie ciekłego metalu. Taki efekt jest pożądany ze względu na znajdujący się w tym miejscu modyfikator i sferoidyzator, dlatego wymuszony ruch ciekłego metalu w przedstawiony sposób pozwoli na osiągnięcie ujednorodnionego metalu, który następnie dodatkowo mieszany jest w obszarze miksera.

3.3. Symulacja – wariant III

Kolejny wariant symulacji zakłada odlewanie w układzie pionowej płaszczyzny podziału, zwykle stosowanym w procesie formowania automatycznego DISA. Na rysunku 11 przedstawione zostały analizowane konstrukcje komór.

Złożenie CAD układu do symulacji odlewania zostało przedstawione na rysunku 12. Wariant III symulacji został przeprowadzony dla komory przedstawionej na rysunku 11A.

Parametry symulacji są takie same jak dla wcześniej prowadzonych badań (dla komory wersja 1). Na rysunku 14 przedstawiona została wizualizacja przepływu ciekłego metalu w obszarze komory reakcyjnej (rys. 13), w której zlokalizowany jest sferoidyzator oraz modyfikator.

Przedstawiona wizualizacja pozwala zauważyć, że od momentu wpłynięcia strugi ciekłego metalu i uderzenia w ścianę przeciwną do wlewu doprowadzającego następuje jej podział na dwie strony. Przemieszczanie się ku górze masy ciekłego metalu oraz kształt wnęki komory

forced to spin achieving fine homogenization. Such conditions are desirable in order to achieve a suitable end structure in the cast.

Comparing the two geometries it can be seen that the use of a baffle in the bottom half of the chamber reduces the possibility of mixing and reducing the speed of the liquid metal. Modifying the shape of the chamber by removing the baffle increases the mixing area and enables visually better mixing of the liquid metal. Such conditions are desirable because the modifier and the spheroidizer additives are located at the bottom. Forced motion of the molten metal will result in a homogeneous metal which is further mixed in the mixer.

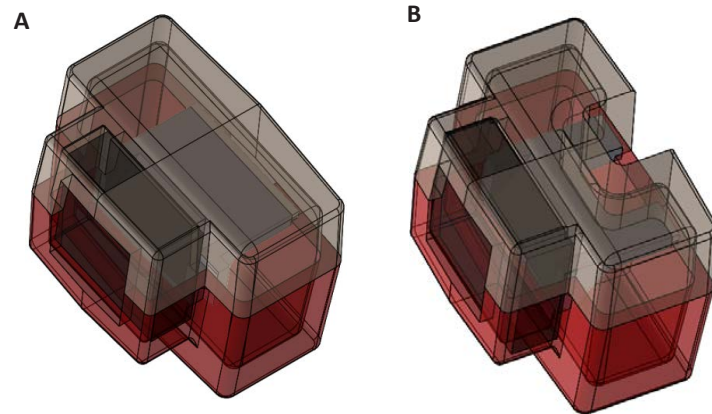
3.3. Simulation – setup III

Next, simulation analysis concerns the casting technology with a vertical parting line normally used in the DISA automatic moulding process. In Figure 11 the reaction chamber for such process are presented.

The CAD software was used similarly to the first part of numerical analysis for assembly of the test gating system and models as is shown in the Figure 12. The simulation setup III was applied for the chamber shape presented in the Figure 11A.

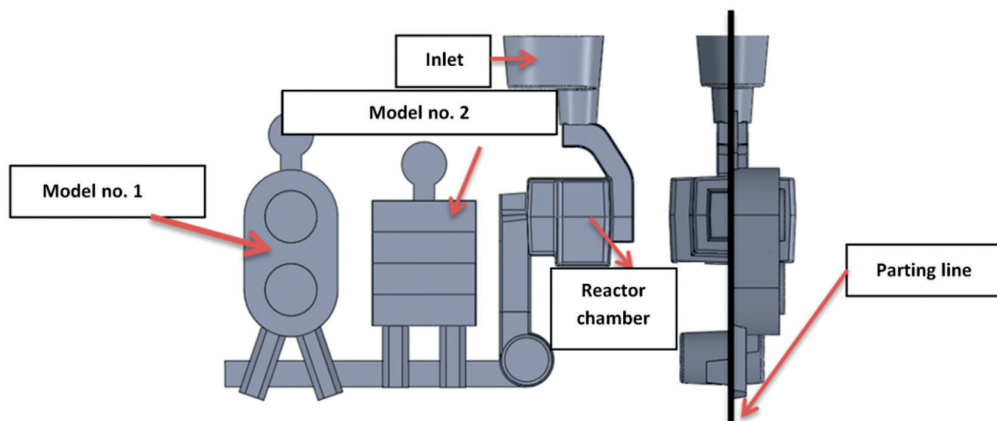
The boundary conditions are similar to the setup used in the simulations for the horizontal parting line (for Chamber ver. 1). Figure 14 presents the flow of liquid metal in the reaction chamber and Figure 13 shows the view direction of visualized results.

From the first moment of filling, the stream hits the wall opposite to the runner where it's divided into two streams. Liquid alloy when moving up starts intensive mixing in this area. This behavior potentially results in proper dissolution of the modifier and the spheroidizer. The presumed assumption is due to the nature of the



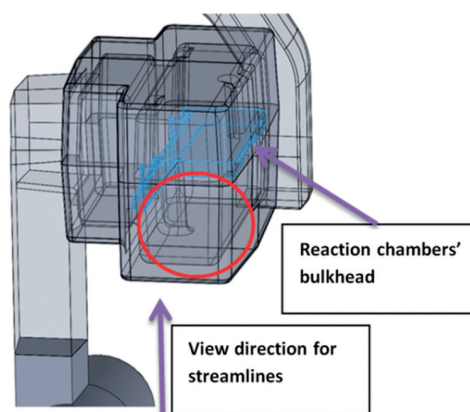
Rys. 11. Konstrukcja komór do odlewania w układzie pionowym, kształt A i B

Fig. 11. The design of the reaction chamber for vertical parting line moulds, design A and B



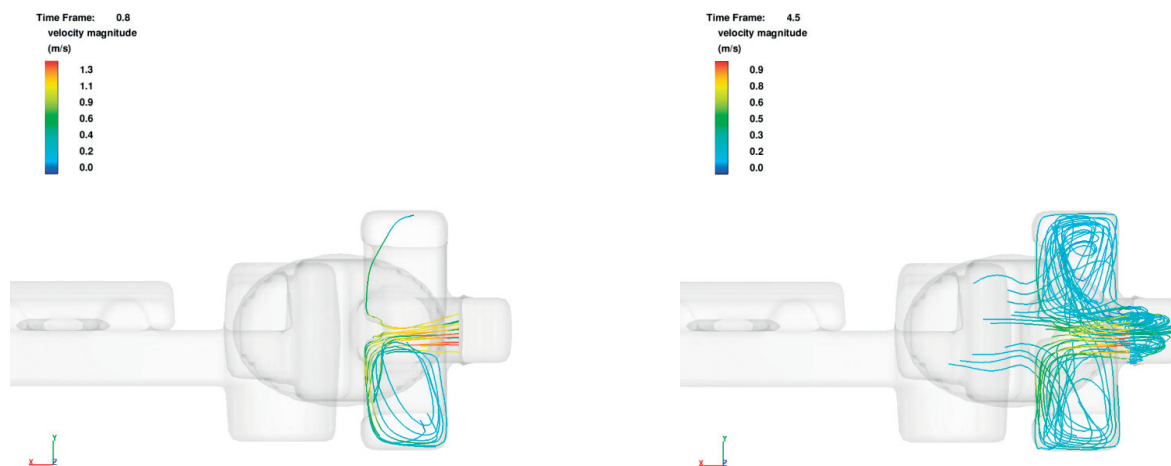
Rys. 12. Układ testowy w układzie pionowego podziału formy

Fig. 12. The test assembly system with a vertical parting line



Rys. 13. Zaznaczony obszar w komorze reakcyjnej, gdzie zlokalizowany jest sferoidyzator i modyfikator

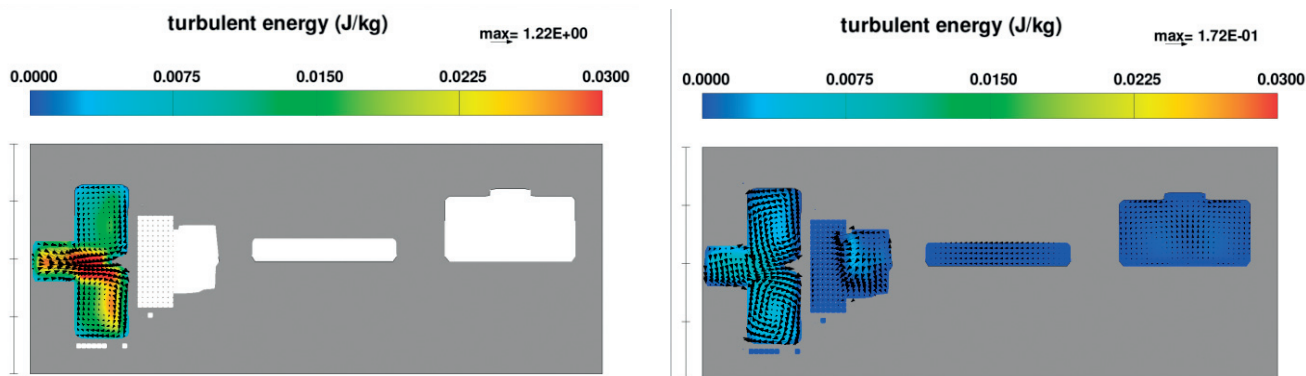
Fig. 13. View direction of the area in the reaction chamber where the spheroidizer and modifier are located



Rys. 14. Wizualizacja przepływu w komorze reakcyjnej dla $t_1 = 0,8$ s (z lewej) i $t_2 = 4,5$ s (z prawej)
 Fig. 14. Visualization of the streamlines in the reaction chamber in $t_1 = 0.8$ s (left) and $t_2 = 4.5$ s (right)

powoduje intensywne mieszanie ciekłego metalu w tym obszarze. Takie zachowanie ciekłego metalu potencjalnie powoduje odpowiednie rozpuszczanie modyfikatora i sferoidyzatora oraz ujednorodnianie ciekłego metalu. Postawione przypuszczenie wynika z charakteru linii przepływu. Mieszanie trwa niemal przez cały czas wypełniania wnęki formy. Poniżej dla wybranych kroków czasowych t_1 i t_2 (rys. 15) przedstawiona została energia turbulencji, która jest średnią energią kinetyczną na jednostkę masy związaną z wirami podczas przepływu.

liquid metal flow. In Figure 15 the turbulence energy is shown, which corresponded to the average kinetic energy per unit mass associated with mixing during flow.



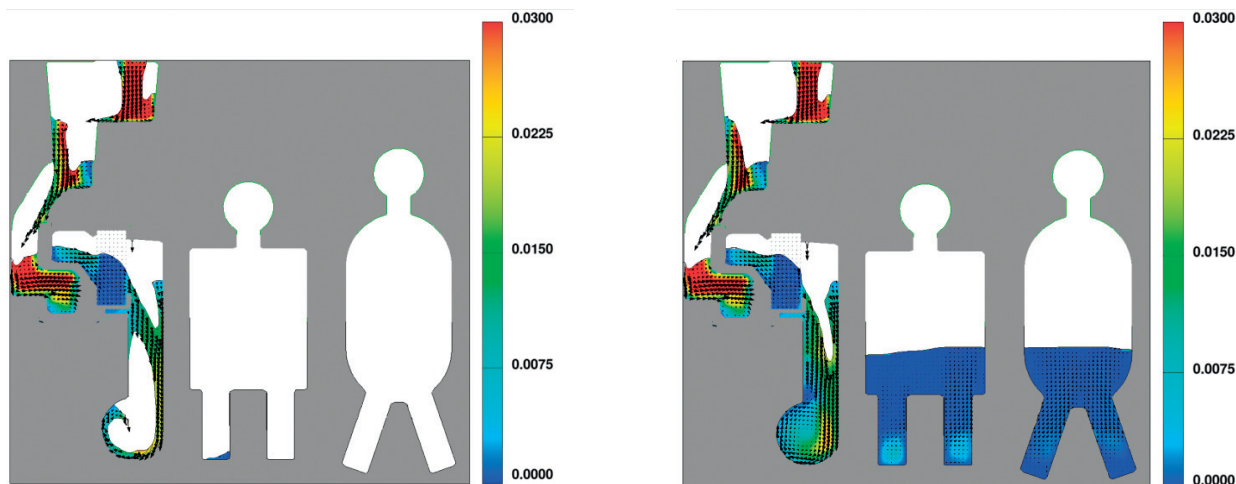
Rys. 15. Wizualizacja wektorów kierunku przepływu oraz energii turbulencji dla $t_1 = 2,5$ s (z lewej) i $t_2 = 5$ s (z prawej)
 Fig. 15. Visualization of the flow vectors direction and turbulence energy in $t_1 = 2.5$ s (left) and $t_2 = 5$ s (right)

Na rysunku 16 przedstawiony został przepływ w obszarze miksera, którego zadaniem jest dodatkowe ujednorodnianie ciekłego metalu.

Figure 16 shows the flow in the area of the mixer, which is the task of additional homogenization of the liquid metal.

Swobodne opadanie ciekłego metalu w kierunku miksera powoduje wzrost prędkości i energii kinetycznej. Walcowy kształt miksera dodatkowo wymusza ruch po ścianach, powodując intensywne mieszanie się ciekłego metalu. Zadaniem miksera, co zostało wspomniane powyżej, jest wywołanie właśnie takiego ruchu cieczy.

The free fall of liquid metal towards the mixer results in an increase in speed and kinetic energy. The cylindrical shape mixer additionally forces the walls causing intensive mixing of the liquid metal. The use of the mixer, as mentioned above, is to induce just such liquid movement. The three-dimensional visualization of the

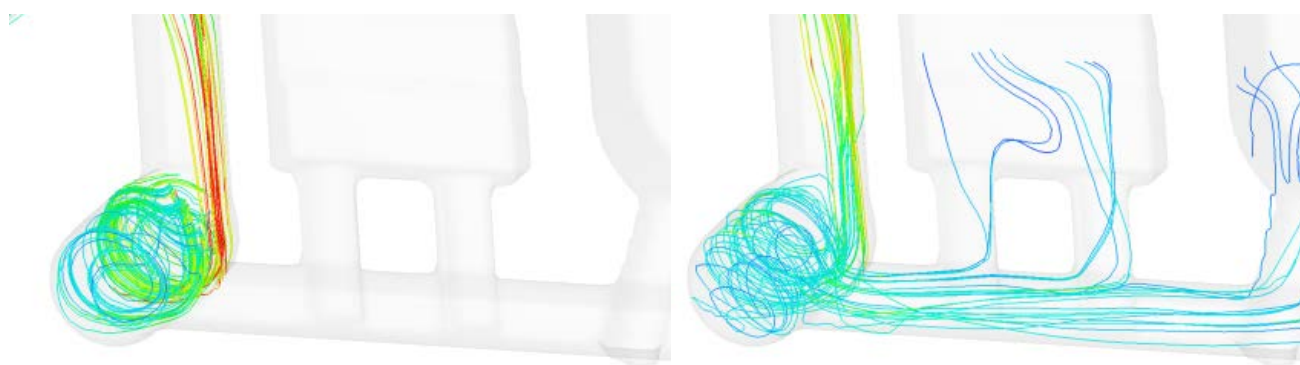


Rys. 16. Wizualizacja energii turbulencji w obszarze miksera dla $t_1 = 2,5$ s (z lewej) i $t_2 = 5$ s (z prawej)

Fig. 16. Visualization of the results of turbulence energy in the mixer area in $t_1 = 2.5$ s (left) and $t_2 = 5$ s (right)

Trójwymiarowa wizualizacja prędkości przepływu ciekłego metalu w obszarze miksera została przedstawiona na rysunku 17.

flow velocity of liquid metal in the mixer area is shown in Figure 17.



Rys. 17. Wizualizacja przepływu w postaci linii prędkości w mikserze dla $t_1 = 2,5$ s (z lewej) i $t_2 = 5$ s (z prawej)

Fig. 17. Visualization of the flow streamlines in the mixer area in $t_1 = 2.5$ s (left) and $t_2 = 5$ s (right)

3.4. Symulacja – wariant IV

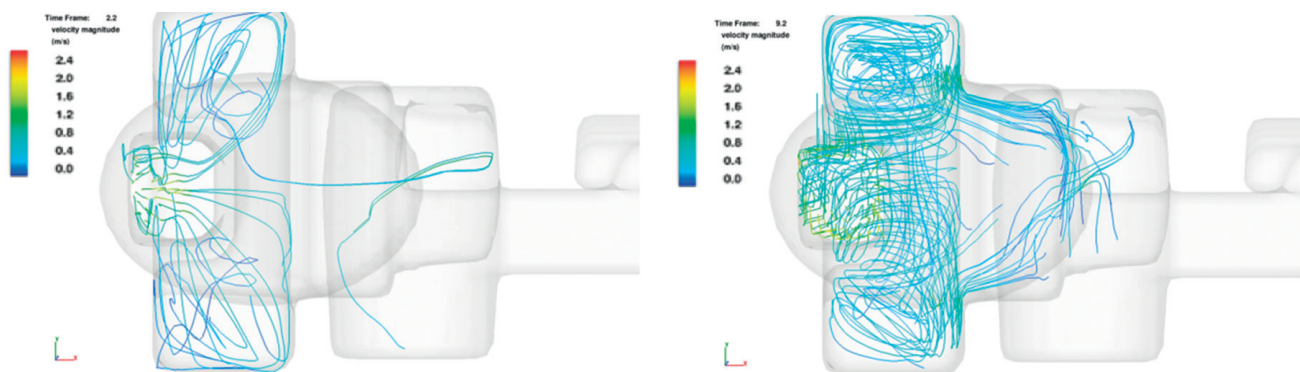
Kolejny wariant symulacji (dla komory wersja 4-1) dla identycznych warunków brzegowych został przeprowadzony dla komory reakcyjnej przedstawionej na rysunku 11B. Układ modelowy różni się jedynie kształtem komory, natomiast odległości poszczególnych modeli oraz miksera nie uległy zmianie. Wizualizacja prędkości przepływu w rzucie została przedstawiona na rysunku 18.

Analiza wyników pozwala zauważyć, że w początkowej fazie wypełniania objętości komory reakcyjnej prędkość strugi ciekłego metalu wynosi ok. 1,9 m/s. Porównując tę wartość do wartości z wcześniejszej analizy w czasie 0,5 s trwania wirtualnego eksperymentu, prędkość jest większa o ok. 0,8 m/s. Ze względu na konstrukcję komory wysokość wlewu głównego wymusza wyższą wartość ciśnienia metalostatycznego, co może powodować sil-

3.4. Simulation – setup IV

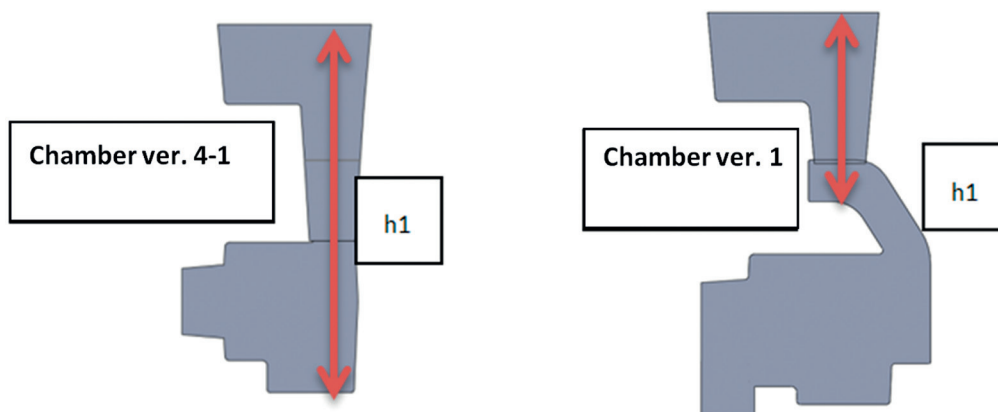
Next, a simulation setup (for Chamber ver. 4-1) was prepared for the reaction chamber design presented in Figure 11B. The boundary condition was set as in earlier iterations. The test assembly is different only in the shape of the chamber, all other dimensions are the same. The results are presented in Figure 18.

Analysis of the results shows that in the initial phase of filling the velocity of the liquid metal is near $v = 1.9$ m/s. Comparing this value to the setup III the velocity is higher by approx. $v = 0.38$ m/s in the same time step, $t = 0.5$ s of the virtual experiment. Due to the design of the chamber the flow pattern could be more turbulent. Because of that, the design was changed as shown in Figure 19.



Rys. 18. Wizualizacja prędkości przepływu ciekłego metalu w postaci linii przepływu dla $t_1 = 2,2$ s (z lewej) i $t_2 = 9$ s (z prawej)
 Fig. 18. Visualization of the streamlines flow for $t_1 = 2.2$ s (left) and $t_2 = 9$ s (right)

nie turbulentny przepływ. Nie oznacza to jednak braku mieszania, jednak jest ono w porównaniu do wcześniejszych analiz mniej ujednorodniające ciekły metal w tej objętości. Z tego powodu zaproponowana została zmiana w postaci dołączonego wlewu doprowadzającego, co zostało przedstawione na [rysunku 19](#).



Rys. 19. Przedstawienie przekroju poprzecznego dla komór reakcyjnych
 Fig. 19. Cross-section of two designs of the reaction chambers

Charakter przepływu w obszarze miksera jest bardzo zbliżony do wyników przedstawionych dla wariantu III symulacji. Jak zostało wspomniane, kształt miksera wymusza naturalny ruch względem geometrii wnęki formy odtwarzanej przez model.

4. Wnioski

Prezentowana analiza jest jedną z faz realizowanego projektu badawczo-rozwojowego, mającego na celu zaprojektowanie ekologicznej technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego w formie. Wykonane symulacje przepływu ciekłego metalu w układzie komory reakcyjnej, układu wlewowego oraz próbek technologicznych

The flow pattern in the region of the mixer is very similar to the results presented in the setup III simulation. As mentioned, the shape of the mixer forces the movement of the liquid metal in a certain pattern.

4. Conclusions

The presented analysis is one of the phases of a research and development project aimed at designing ecological technology for the production of ductile cast iron. The simulations of liquid metal flow in the reaction chamber system, gating system and samples allowed to compare the proposed shape of the reaction

pozwoły na porównanie proponowanych kształtów komór reakcyjnych. Przeprowadzenie analizy symulacyjnej pozwoliło na wprowadzenie zmian w geometrii komory. Zaproponowana zmiana powoduje powstanie warunków zapewniających lepsze mieszanie się ciekłego metalu w obszarze, w którym umieszczony jest modyfikator i sferoidyzator. Umieszczenie miksera w układzie wlewowym zapewnia dodatkowy obszar, w którym w trakcie mieszania ciekły metal dodatkowo zostaje ujednorodniony.

chambers. Based on simulation results, design changes were introduced in the reaction chambers. The proposed changes result in conditions that ensure better mixing of the liquid metal in the area where the modifier and the spheroidizer are located. Placing the mixer in the gating system provides an additional area in which additional mixing of the liquid metal occurs with further liquid homogenization. Further laboratory trials encompassing a large amount of laboratory and industrial trials with designed reaction chambers are required.

Podziękowania

Artykuł przygotowano w ramach projektu NCBR nr INNOTECH K3/IN3/54/227695/NCBR/14.

Acknowledgement

This article was prepared under the NCBR project no. INNOTECH K3/IN3/54/227695/NCBR/14.

Literatura/References

1. Sobczak J.J., E. Balcer, A. Kryczek. 2016. „Sytuacja odlewnictwa w Polsce i na świecie – stan aktualny, tendencje i prognozy”. *Przegląd Odlewnictwa* 66 (1–2) : 16–22.
2. Guzik E. 2001. *Procesy uszlachetniania żeliwa – wybrane zagadnienia*. Katowice: Archiwum Odlewnictwa, Monografia nr 1.
3. Fraś E., C. Podrzucki. 1981. *Żeliwo modyfikowane*. Kraków: AGH.
4. *Sorelmetal: o żeliwie sferoidalnym*. 2006. Warszawa: Metals Minerals.
5. Guzik E., M. Asłanowicz, R. Kluk. 1995. „Zabieg sferoidyzowania przy użyciu przewodu elastycznego”. *Krzepnięcie Metali i Stopów* (22) : 76–81.
6. Pytel A., Z. Stefański. 2006. „Wybrane aspekty zabiegu wermikularyzowania żeliwa w formie odlewniczej”. *Archiwum Odlewnictwa* 6 (18) : 27–32.
7. Stefański Z., A. Pytel. Patent PL 220357. 2015. *Reaktor do wytwarzania żeliwa wysokojakościowego, zwłaszcza sferoidalnego lub wermikularnego*.
8. Gwiżdż A., M. Małysza, M. Nowak. 2013. „Use of Flow-3D program for simulation of pouring and solidification process of ductile cast iron castings. Part I”. *Transactions of the Foundry Research Institute* 53 (1) : 35–53.
9. Kowalski P., K. Wańczyk, M. Małysza, A. Gil. 2015. „Numerical Analysis of Casting Process of the Diesel Engine Compressor Rotor”. *Archives of Foundry Engineering* 15 (2) : 51–54.
10. Pysz S., R. Żuczek, E. Czekaj, A. Karwiński, M. Małysza, P. Sprawka. 2014. „Integration of numerical procedures in the design and manufacturing technology on the example of a cast component for the automotive industry”. *Foundry Trade Journal International* 188 (3711) : 26–29.
11. Burkhadarov M.R., C.W. Hirt. *Casting Simulation: Mold Filling and Solidification – Benchmark Calculations Using Flow3D*, <https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/08/Casting-Simulation-Mold-Filling-and-Solidification-Benchmark-Calculations-Using-FLOW-3D.pdf>.
12. *Flow 3D, User Manual v10.1*.

