

**Doświadczalna weryfikacja symulacji procesu odlewania odśrodkowego
w formach ceramicznych**

Experimental verification of the simulation of centrifugal casting in ceramic moulds

Wojciech Leśniewski¹, Piotr Wieliczko¹, Marcin Małysza¹

¹Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

¹Foundry Research Institute, Centre for Designing and Prototyping, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

E-mail: wojciech.lesniewski@iod.krakow.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z ustaleniem rzeczywistego przepływu ciekłego metalu w formie podczas procesu odlewania odśrodkowego w indukcyjnym piecu próżniowym firmy SuperCast Linn HighTherm.

W procesie odlewania odśrodkowego wykorzystywany jest wpływ siły odśrodkowej na przepływ ciekłego metalu w formie, a następnie powodowany nią wzrost ciśnienia ciekłego – krzepnącego metalu. Dla prędkości wirowania formy równej 250 rpm i odległości formy wynoszącej 0,2 m od osi obrotu wartość siły odśrodkowej działającej na ciekły metal jest 14 razy większa od siły grawitacji. Mimo tak dużej siły często obserwowano w odlewach wykonanych w indukcyjnych piecach odśrodkowych niedolewy, których przyczyny były niewyjaśnione. Działająca w tym przypadku siła grawitacji nie ma istotnego znaczenia na przepływ metalu w wirującej formie.

Podczas wykonywania odlewów w piecu odśrodkowym na powierzchni tygla pozostaje pewna ilość metalu wskazująca, że podczas odlewania na ciekły metal muszą oddziaływać minimum dwie siły. Jedną z nich jest siła odśrodkowa wymuszająca przepływ metalu równoległe do promienia wodzącego wirującej formy. Zwrot drugiej siły jest skierowany prostopadłe do kierunku promienia wodzącego, na co wskazuje pozostałość zakrzepniętego metalu w kanale wylewowym tygla.

Wykorzystując specjalnie dobraną geometrię zestawu odlewniczego, przeprowadzono serię doświadczeń, umożliwiającą zaobserwowanie sposobu przepływu i wypełniania formy.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że podczas symulacji komputerowej prowadzonej w nieinercjalnych układach odniesienia uwzględnienie siły Coriolisa wyjaśnia przepływ metalu podczas odśrodkowego zalewania formy.

Przeprowadzone obliczenia komputerowe potwierdziły zgodność z wynikami przeprowadzonych doświadczeń.

Słowa kluczowe: odlewanie odśrodkowe, symulacja komputerowa, Flow-3D, modele woskowe, siła odśrodkowa, siła Coriolisa

Abstract

This paper presents the results of work on the determination of actual molten metal flow in a mould during centrifugal casting in the SuperCast induction vacuum furnace manufactured by Linn HighTherm.

The centrifugal casting process uses the effect of centrifugal force on the flow of liquid metal in the mould with a resulting increase of the liquid and solidifying metal pressure. At the mould rotational speed of 250 rpm and the mould distance of 0.2 m from the rotation axis, the centrifugal force acting on the liquid metal is 14 times higher than the force of gravity. Despite a high force, misruns of unexplained origin have been found in castings from centrifugal induction furnaces. Here the action of gravity is insignificant to the flow of metal within the rotating mould.

When casting in centrifugal forces, a certain amount of metal remains on the crucible surface, indicative of a minimum two forces present and acting on the liquid metal during the process. One is the centrifugal force, which prompts the flow of metal in parallel to the radius vector of the rotating mould. The sense of the other force is directed perpendicularly to the radius vector direction, as suggested by the residues of solidified metal in the crucible spout.

A specially designed geometry of the casting system has been used in a series of experiments to observe the way in which the flow and casting filling occur.

The analysis of produced results suggests that the inclusion of the Coriolis force in the computer-aided simulation of non-inertial reference systems explains the metal flow during centrifugal pouring.

The computer calculations have proven the results of the said experiments.

Keywords: centrifugal casting, computer simulation, Flow-3D, wax models, centrifugal force, Coriolis force

1. Odlewanie odśrodkowe

W procesie odlewania odśrodkowego siła odśrodkowa wymusza pożądany przepływ ciekłego metalu w formie, a następnie ułatwia jej wypełnienie. W warunkach ustalonych, tj. po wypełnieniu formy, wartość siły odśrodkowej działającej na ciekły metal określa wzór (1):

$$\vec{F}_{cf} = m \cdot \omega^2 \cdot \vec{R} \quad (1)$$

gdzie:

\vec{R} – promień, m,

ω – prędkość kątowna, rad/s,

m – masa ciała, kg.

Siła odśrodkowa znacznie większa od siły grawitacji, działająca na ciekły metal, umożliwia znaczne zmniejszenie wymiarów układu wlewowego. Podczas zalewania grawitacyjnego jednym z zadań układu wlewowego jest zapewnienie odpowiedniego ciśnienia metalostaticznego umożliwiającego prawidłowe wypełnienie formy ciekłym metalem. W przypadku odlewania odśrodkowego układ wlewowy może zostać ograniczony, należy jednak pamiętać, że z uwagi na dużą wartość siły dośrodkowej działającej po wypełnieniu wirującej formy ciekłym metalem należy zapewnić odpowiednią wytrzymałość mechaniczną formy odlewniczej. Prof. Zbigniew Górny w swojej pracy [1] rozróżnia trzy sposoby odlewania, wykorzystujące odmienne efekty, uzyskane dzięki działaniu siły odśrodkowej (rys. 1).

Proces odlewania w piecu SuperCast wykorzystuje odlewanie odśrodkowe pod wpływem ciśnienia odśrodkowego (rys. 2).

1. Centrifugal casting

In the centrifugal casting process the centrifugal force generates the required flow of a molten metal in the mould and facilitates filling of the vessel. When in the steady state, which is after the mould has been filled, the centrifugal force acting on the liquid metal is expressed by the following formula (1):

with:

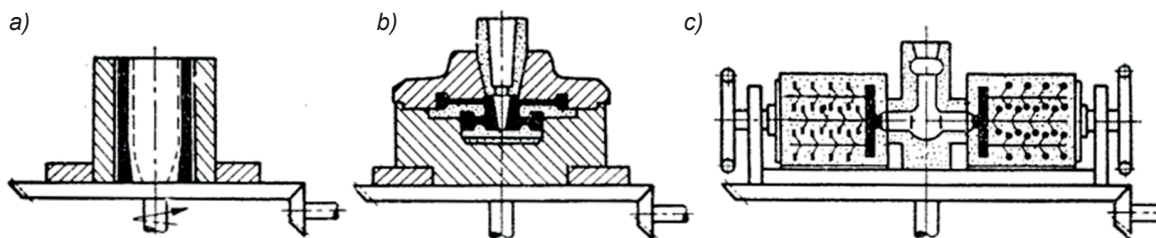
\vec{R} – radius, m,

ω – angular velocity, rad/s,

m – body mass, kg.

A centrifugal force much greater than gravity and acting on liquid metal allows a significant reduction of the gating system dimensions. During the gravity casting process, one of the functions of a gating system is to assure the correct metallostatic pressure to properly fill the mould with molten metal. In centrifugal casting, the gating system can be reduced; however, note that the relatively high centrifugal force in action following the filling with liquid metal requires a sufficient mechanical strength of the casting mould. In his paper [1], Professor Zbigniew Górny distinguishes three types of casting, each with different effects of the centrifugal force (Fig. 1).

The casting process in a SuperCast furnace uses the centrifugal pressure casting process (Fig. 2).



Rys. 1. Podstawowe sposoby odlewania w formach wirujących: a) odśrodkowe właściwe, b) półodśrodkowe, c) pod ciśnieniem odśrodkowym

Fig. 1. Basic casting processes in rotating moulds: a) true centrifugal casting, b) – semi-centrifugal casting, c) centrifugal pressure casting

Podstawowe parametry indukcyjnego odśrodkowego pieca próżniowego:

– wymiar formy: 345 mm × 220 mm × 200 mm,

Key characteristics of the induction vacuum centrifugal furnace:

– mould size: 345 mm × 220 mm × 200 mm,

- masa topionego wsadu: stopy tytanu – 1,5 kg,
- prędkość obrotowa ramienia: max. 300 rpm.
- melted stock mass: titanium alloys – 1.5 kg,
- arm speed: max. 300 rpm.



Rys. 2. Indukcyjny odśrodkowy piec próżniowy SuperCast

Fig. 2. SuperCast induction vacuum centrifugal furnace

Zasadniczą część pieca stanowi ramię obrotowe wyposażone w szczelną komorę roboczą oraz regulowaną przeciwwagę. Komora wyposażona jest w tygiel kwarcowy, wewnątrz którego podczas prowadzenia wytopu umieszczony jest ceramiczny tygiel roboczy z wsadem metalowym, pochylony o 9° względem osi obrotu. Po umieszczeniu w komorze formy ceramicznej oraz tygla z wsadem należy, wykorzystując przeciwwagę, doprowadzić do zrównoważenia ramienia obrotowego. Energia niezbędna do stopienia wsadu dostarczana jest przez cewkę indukcyjną, która w położeniu roboczym jest podnoszona do góry i otacza tygiel kwarcowy z umieszczonym w nim tygłem ceramicznym. Po ręcznym uruchomieniu procesu odlewania cewka indukcyjna jest przesuwana poniżej tygla kwarcowego, zaś ramię robocze rozpoczyna wirować zgodnie z wprowadzonym programem. Topienie odbywa się w atmosferze ochronnej argonu.

2. Wstępna analiza drogi ciekłego metalu podczas procesu odlewniczego

Podczas wykonywania pierwszych odlewów na urządzeniu SuperCast otrzymywano odlewy z wadami, których przyczyny były trudne do ustalenia. Wadom odlewniczym towarzyszyło zwykle przelewanie się metalu nad układem wlewowym. Analiza pozostałości metalu w tyglu wskazywała, że w procesie przelewania metalu z tygla do formy występuje poza siłą odśrodkową jeszcze jedna siła skierowana do niej prostopadle. W rezultacie przepływ ciekłego metalu w kanale wylewowym tygla następował zawsze po stożkowej spirali (rys. 3).

W przypadku zalewania odśrodkowego mamy do czynienia zarówno z ruchem obrotowym formy, jak i przemieszczaniem się metalu w formie wywołanym działaniem siły odśrodkowej. Jeżeli w układzie podle-

The essential part of the furnace is the rotating arm with a hermetic processing chamber and an adjustable counterweight system. The processing chamber has a quartz crucible, inside of which a ceramic processing crucible with the metallic stock is placed for the duration of the melting. Once the ceramic mould and the stocked crucible, which is leaning at an angle of 9° relative to the rotation axle, are placed in the chamber, the counterweight system is used to balance the rotating arm. The energy required to melt the stock is provided by an induction coil which, when in the working position, is raised to enclose the quartz crucible with the ceramic crucible inside. Once the casting process is manually initiated, the induction coil moves below the quartz crucible and the arm starts to spin according to the pre-set furnace program. The melting process occurs in the argon shroud.

2. Preliminary analysis of the molten metal routing during the casting process

The first casts on the SuperCast furnace resulted in castings with defects of which the origins were problematic to identify. The casting defects were usually concomitant to overflow of the metal over the gating system. The analysis of the metal residues in the crucible revealed that during the pouring of metal from the crucible to the mould another force exists perpendicularly to the centrifugal force. As a result, the molten metal flow through the spout always progressed along a conical helix (Fig. 3).

Centrifugal casting occurs with the rotational movement of the mould and the movement of metal in the mould under centrifugal force. If the system subject to the rotational movement features a radial movement



Rys. 3. Tygiel ceramiczny oraz pozostałości metalu w jego kanale wylewowym

Fig. 3. Ceramic crucible with the metal residues in the spout

gającym ruchowi obrotowemu występuje również ruch masy następujący wzdłuż promienia, to w takim przypadku należy uwzględnić efekty spowodowane działaniem siły Coriolisa.

Próba przedstawienia efektu działania tej siły nie jest zagadnieniem łatwym. Siła Coriolisa, a więc i przyspieszenie Coriolisa, działa tylko wówczas, gdy następuje ruch metalu względem wirującej formy. Po wypełnieniu formy przyspieszenie to znika i możemy taki układ traktować podobnie jak podczas zalewania grawitacyjnego, zwiększając odpowiednio ciśnienie metalostaticzne.

Siła Coriolisa występuje, gdy ciało ma niezerową prędkość w układzie nieinercyjnym. Jest ona prostopadła do wektora prędkości ciała i wektora prędkości kątowej.

Wartość tej siły wynosi (2):

$$\vec{F}_c = -2 \cdot m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (2)$$

gdzie:

m – masa ciała, kg

\vec{v} – wektor prędkości własnej, m/s

$\vec{\omega}$ – wektor prędkości kątowej układu, rad/s.

with:

m – body mass, kg

\vec{v} – proper speed vector, m/s

$\vec{\omega}$ – angular velocity vector of the system, rad/s.

Autorzy postanowili przeprowadzić próby porównania odlewania specjalnie zaprojektowanego elementu z symulacją komputerową przeprowadzoną dla odpowiadającej mu geometrii formy.

3. Porównanie symulacji komputerowej z wynikami uzyskanymi doświadczalnie

W celu określenia kolejnych etapów wypełniania formy metalem postanowiono wykorzystać geometrię odlewu przypominającą kotwicę (rys. 4). Kształt ten umożliwił prosty sposób wykonania kilku jednakowych form odlewniczych. Doświadczalne formy wykonano zgodnie z techniką wytapianych modeli w ceramicznych masach gipsowych [4]. Wybrana geometria nie pozwala na prze-

of mass, the effects of the Coriolis force must also be considered.

Any attempt to present those effects is problematic. The Coriolis force, and thus the Coriolis acceleration, occurs only when the metal moves relative to a rotating mould. Once the mould has been filled, the Coriolis acceleration ceases and the system can be processed not unlike gravity casting, i.e. by suitably increasing the metalostatic pressure.

The Coriolis force is present when a body has a non-zero speed in the non-inertial reference system. The Coriolis force is perpendicular to the body speed vector and the angular velocity vector.

The Coriolis force value is (2):

The authors decided to test the comparison of the casting process of a specially designed part with the computer-aided simulation carried out for the corresponding mould geometry.

3. Comparison of the computer-aided simulation with the results obtained experimentally

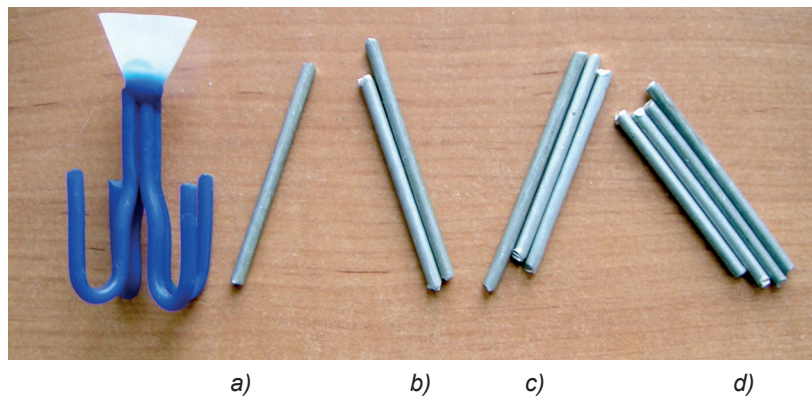
In order to determine the subsequent stages of filling the mould with metal, an anchor-like casting geometry was used (Fig. 4). This form allowed for easy production of several identical casting moulds. The experimental moulds were built using the lost-wax casting technique in ceramic gypsum compounds [4]. The chosen geo-

mieszczanie się ciekłego metalu pomiędzy ramionami kotwicy podczas odśrodkowego zalewania formy.

Wykonano kolejno cztery odlewy, zwiększając ilość topionego metalu (rys. 4a,b,c,d) tak, aby podczas procesu zalewania metal mógł swobodnie wypełniać coraz większe fragmenty formy. Masę gipsową po zastygnięciu metalu uważnie wypłukano, sprawdzając które fragmenty formy zostały wypełnione metalem. Siła Coriolisa oraz siła odśrodkowa powodują niesymetryczne wypełnianie formy. Ciekły metal podczas zalewania nie wypełnia całej objętości układu wlewowego, lecz płynie po stronie powierzchni wskazywanej przez kierunek działania wektora siły Coriolisa. W rezultacie odlew wypełniany jest przez metal stopniowo, zalewając kolejno poszczególne ramiona kotwicy. Uzyskane wyniki doświadczalne zweryfikowano, wykorzystując symulację komputerową przeprowadzoną w programie Flow-3D z zastosowaniem nieinercyjnego układu odniesienia oraz geometrii wnętrza formy przedstawionej na rysunku 5 [2,3].

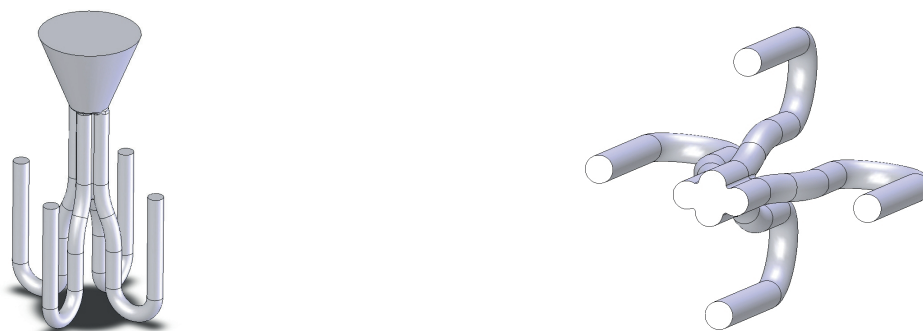
metrical form prevented movement of molten metal between the anchor arms during centrifugal casting to the mould.

Four castings were made in succession by increasing the molten metal quantity (Fig. 4a,b,c and d) so as to have the metal freely fill the increasing volume of the mould. The gypsum compound was carefully rinsed once the metal was solid and inspected to identify the mould portions filled with metal. The Coriolis force and the centrifugal force result in asymmetrical filling of the mould. When poured, the liquid metal does not fill the entire volume of the gating system, it flows along the surface side indicated by the direction of the Coriolis force vector. As a result, the casting is poured gradually and the metal successively fills the individual arms of the anchor. The produced experimental results were verified by computer-aided simulation in the Flow-3D software by adopting a non-inertial reference system and the mould cavity geometry as shown in Figure 5 [2,3].



Rys. 4. Model woskowy oraz (a–d) kolejne rosnące porcje metalu wykorzystane w poszczególnych próbach procesu odlewania

Fig. 4. The wax model and (a–d) the successively larger stocks of metal used in individual tests of the casting process



Rys. 5. Geometria wnętrza formy wykorzystana podczas symulacji komputerowej

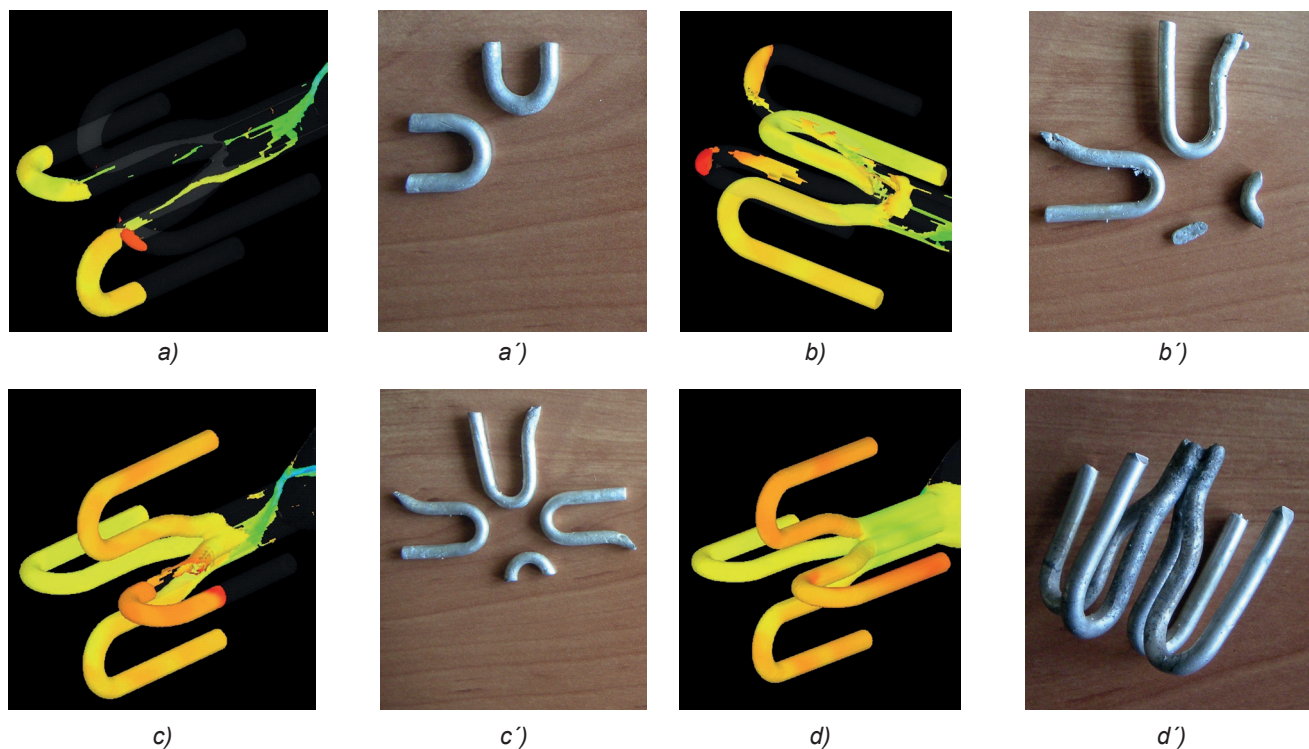
Fig. 5. Mould cavity geometry used in the computer-aided simulation

Rysunek 6a,b,c,d przedstawia wybrane fragmenty symulacji komputerowej. Rysunki 6a',b',c',d' prezentują odpowiadające danemu etapowi symulacji wyniki rzeczywistych prób odlewania kotwicy przeprowadzonych dla kolejno rosnących porcji wsadu metalowego. Wyniki

Figure 6a,b,c and d show selected portions of the computer-aided simulation. Figure 6a',b',c' and d' show the results of actual anchor casting tests, made for increasing stocks of metal and respective of the simulation stages. The computer-aided simulation results fully

symulacji komputerowej wykazują pełną zgodność z wynikami przeprowadzonych prób zalewania form rosnącą kolejno ilością ciekłego metalu.

match the results of the tests of mould casting with successively increasing liquid metal volumes.

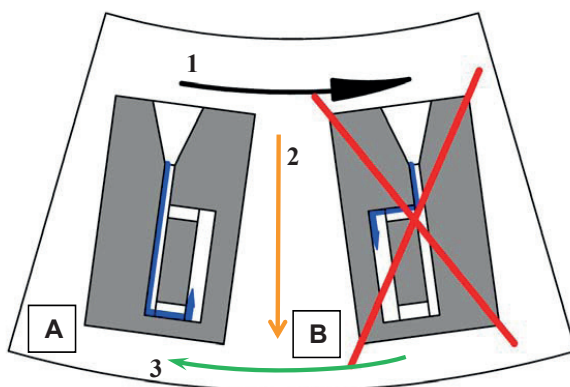


Rys. 6. Kolejne etapy wypełniania wnętrza formy wg symulacji komputerowej (a-d) oraz podczas rzeczywistych eksperymentów (a'-d')

Fig. 6. Successive stages of mould cavity filling in the computer-aided simulation (a-d) and the actual experiments (a'-d')

4. Sposób projektowania układów wlewowych w odlewaniu odśrodkowym

4. The method of designing gating systems in centrifugal casting



Rys. 7. Dwa różne sposoby umieszczenia formy względem kierunku wirowania komory pieca: A – prawidłowy, B – nieprawidłowy, 1 – kierunek wirowania komory pieca, 2 – siła odśrodkowa, 3 – kierunek działania siły Coriolisa

Fig. 7. Two different methods of locating the mould relative to the furnace chamber direction of rotation: A – correct, B – incorrect, 1 – direction of to the furnace chamber rotation, 2 – centrifugal force, 3 – direction of the Coriolis force

Wykorzystując program Flow-3D można w sposób najkorzystniejszy zaprojektować zestaw odlewniczy przeznaczony do wykonywania odlewu w indukcyjnym odśrodkowym piecu próżniowym. Przeprowadzone symulacje pozwalają na wyraźne rozróżnienie dwóch wydajnych podobnych zestawów odlewniczych (rys. 7A, B). Kierunek wirowania ramienia odlewniczego decyduje o kolejności wypełniania elementów układu przez ciekły metal. W przypadku A wypełnienie odlewane elementu następuje od dołu, tak jak w przypadku zalewania syfonowego. W przypadku B struga metalu jest przerywana, metal wypełnia odlewany element od góry, a następnie od dołu, co prowadzi do otrzymania odlewu wybrakowanego – w znacznej objętości porowatego.

5. Podsumowanie

Fizyczne efekty działania siły Coriolisa mogą przekraczać efekty wywołane siłą odśrodkową. Kierunek działania siły Coriolisa powoduje, że geometria układu nieinercyjnego staje się niesymetryczna. W przypadku bardziej skomplikowanego zestawu odlewniczego warto przeprowadzić symulację komputerową z wykorzystaniem programu Flow-3D. Symulacja komputerowa bardzo dobrze odwzorowuje rzeczywisty eksperyment. Jej wyniki ułatwiają wprowadzenie zmian zapewniających wypełnianie formy metalem o uspokojonym przepływie oraz jednoznacznie określonym kierunku przepływu. Zaskakujące oddziaływanie siły Coriolisa bardzo dobrze oddaje poniższy wiersz [5]:

*Coriolis na karuzeli nocą
Został zdjęty wielką niemocą
Gdy ostrożnie oglądając się za siebie
do przodu czynił krok.
Zawsze niewidzialny duch uparcie
przesuwał go w bok.*

Podziękowania

Prace przedstawione w artykule zostały sfinansowane z Programu Polskie Sztuczne Serce. Autorzy dziękują Panu Michałowi Woś z firmy Econocap Polska sp. z o.o. za rzetelne wprowadzenie do programu symulacyjnego Flow3D.

Literatura/References

1. Górny, Z. (1966). *Odlewanie w formach wirujących*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
2. Karwiński, A. et al. (2014). Casting of Titanium Alloys in Centrifugal Induction Furnaces. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(1), 403–406.
3. *Flow3D: User manual v10*, 2011.
4. Flow Science, Inc. (2004). *Multi-Block Gridding Technique for FLOW-3D*.
5. Morin D. et al. *Coriolis force*. http://en.citizendium.org/wiki/Coriolis_force [dostęp: 3.11.2014].

The Flow-3D software is the most optimal way of designing a casting system for an induction vacuum centrifugal furnace. The completed simulations allow a clear distinction between two seemingly similar casting systems (Fig. 7 A and B). The casting arm direction of rotation defines the sequence of filling the system parts with molten metal. In case A the cast part is filled from the bottom, not unlike in uphill (bottom) casting. In case B, the metal stream is intermittent: the metal fills the casting from the top and then from the bottom, which results in a largely porous defective casting.

5. Summary

The physical effects of the Coriolis force may exceed the centrifugal force effects. The Coriolis force direction results in asymmetrical geometry of the non-inertial reference system. Computer-aided simulation in Flow-3D is a reasonable approach to more complex casting systems. Computer simulation reproduces real-world experiments very well. Its results facilitate modifications to assure filling the moulds with metal at a stabilised flow with a uniquely defined direction. The following poem [5] is more than fitting for the unexpected effects of the Coriolis force:

*On a merry-go-round in the night
Coriolis was shaken with fright
Despite how he walked
'Twas like he was stalked
By some fiend always pushing him right.*

Acknowledgement

Studies presented in this article were funded by the Polish Artificial Heart Programme. The authors wish to thank Mr. Michał Woś from the Econocap Poland sp. z o.o, Company for a comprehensive and accurate introduction to the Flow3D simulation software.

