

BADANIA SYMULACYJNE WARUNKÓW WYPEŁNIENIA WNĘKI FORMY CIEKŁYM METALEM W TECHNOLOGII MODELI ZGAZOWYWANYCH

SIMULATION STUDIES OF MOULD FILLING CONDITIONS WITH MOLTEN METAL IN EVAPORATIVE PATTERN TECHNOLOGY

Stanisław Pysz¹, Zdzisław Żółkiewicz¹, Robert Żuczek¹, Zbigniew Maniowski¹,
Zbigniew Sierant², Mariusz Młyński²

¹Institut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

²METALODLEW SA, ul. Ujastek 1, 31-752 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania symulacyjne przepływu metalu w formie wypełnionej modelem zgazowywanym przeprowadzone z wykorzystaniem dostępnych parametrów termofizycznych. Na końcowe właściwości odlewu wykonanego z wykorzystaniem technologii zgazowywania modelu ma duży wpływ sposób doprowadzenia metalu do wnęki formy, sposób odprowadzenia gazów, jak również właściwości samego modelu styropianowego, czyli jego parametry termofizyczne. Układ wlewowy powinien być tak zaprojektowany, by metal wpływał do wnęki formy, tworząc równą powierzchnię czołową i następowało równomierne zgazowywanie modelu styropianowego. Kształt układu wlewowego, sposób zalewania wpływają na szybkość zapełnienia wnęki formy i kinetykę zgazowywania przez ciekły metal modelu. Stosowanie modeli zgazowywanych do wykonania odlewu wymaga uwzględnienia w procesie zmiennych właściwości fizykochemicznych, w zależności od samego modelu, wpływających na przepływ metalu we wnęcie formy oraz proces zgazowywania modelu.

Słowa kluczowe: dane termofizyczne, symulacja przepływu metalu, układ wlewowy, model zgazowywany

Abstract

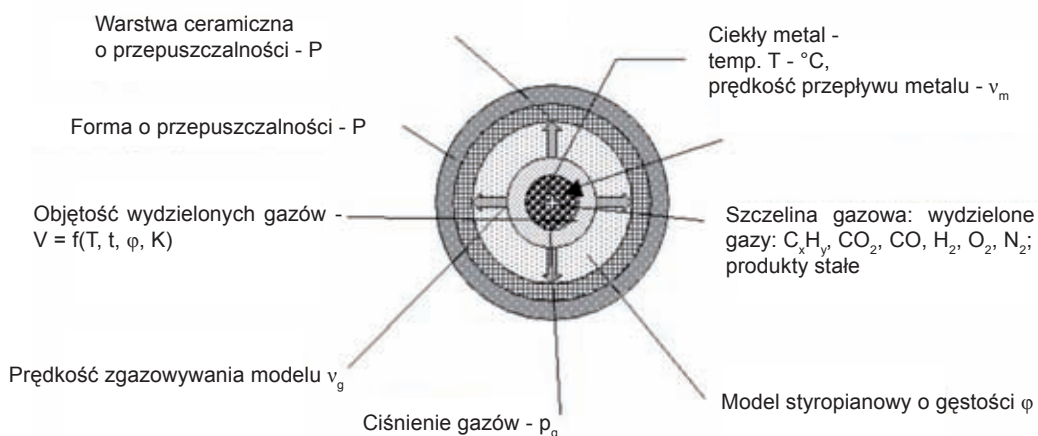
Using available thermo-physical parameters, the paper describes the simulation studies of metal flow in mould filled with an evaporative pattern. The final properties of casting made in a lost-foam process are greatly dependent on the way by which the metal is fed to mould cavity, on the way by which gases are taken off, and also on the properties of the lost foam pattern itself, that is, on its thermophysical parameters. The gating system should be designed in a way such as to let metal flow into mould cavity with an even front surface, enabling a uniform evaporation of pattern made from, e.g., foamed polystyrene. The configuration of a gating system and the technique of metal pouring affect the rate at which the mould cavity is being filled with metal, and hence the kinetics of pattern evaporation under the molten metal effect. When lost foam patterns are used in a casting process, it is necessary to allow for the variable physico-chemical properties, which depend on pattern itself and affect the metal flow behaviour in mould cavity as well as the pattern evaporation process.

Keywords: thermophysical data, simulation of metal flow, filling system, gasification model

Wstęp

Złożoność zjawisk zachodzących podczas wykonywania odlewów w technologii modeli zgazowywanych - znanej między innymi pod nazwą *Lost Foam* - zmusza do dokładnego przeanalizowania systemu wprowadzania metalu do wnęki formy oraz oddziaływania gazów, wydzielających się w wyniku zgazowywania spienionego polistyrenu (styropianu) - na przepływający metal. Występuje zwiększony opór przepływu, zmienia się wymiana ciepła na granicy metal-gaz (strefa przejściowa) - model zgazowywany. W zależności od rodzaju zachodzących reakcji chemicznych i fizycznych może wystąpić zjawisko przyspieszonego obniżenia temperatury płynącego metalu. Wpłynie to na szybkość przepływu strugi w formie i możliwość pełnego jej wypełnienia przez ciekły metal oraz na jakość powierzchni otrzymanego odlewu. W wyniku złego procesu odprowadzenia gazów powierzchnia odlewu będzie pofałdowana, szczególnie dotyczy to jego górnych powierzchni. Może również wystąpić niepełne wypełnienie wnęki formy, np. w obszarach, gdzie odlew posiada cienką ściankę. Nieuwzględnienie sposobu wyprowadzenia z wnęki formy powstających gazów, np. poprzez wprowadzenie systemu odpowietrzenia, założonej przepuszczalności warstwy pokrycia modelu styropianowego, uniemożliwi usunięcia nadmiaru gazów z formy. Przy wzroście ciśnienia wydzielonych gazów powyżej ciśnienia metalostatycznego płynącego metalu nastąpi zatrzymanie przepływu strugi ciekłego metalu. Przyjęcie za niskich parametrów termofizycznych i nieodpowiednich technologicznych może spowodować obniżkę temperatury ciekłego metalu, co w efekcie spowoduje zmniejszenie szybkości przepływu metalu w formie. Spowoduje to wystąpienie w odlewie wad typu: bąble, zagazowania metalu, niedolewy.

Zjawisko powyższe jest szczególnie zwielokrotnione przy wykonywaniu odlewów o dużej masie i wysokiej temperaturze zalewania.



Rys. 1. Schemat procesu zgazowywania modelu styropianowego

Fig. 1. Schematic representation of the lost foam process

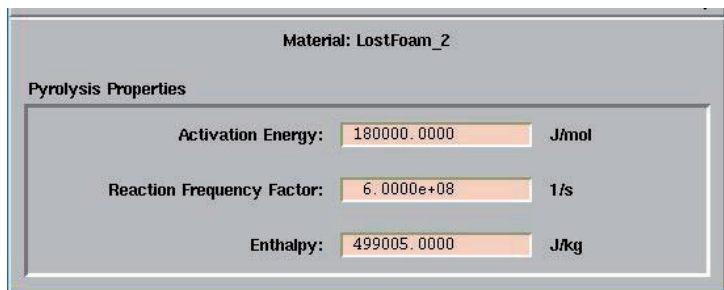
Temperatura ciekłego metalu powoduje termiczną destrukcję modelu styropianowego. W tym obszarze występuje strefa reakcji fizykochemicznych. Zachodzi proces zgazowywania, spalania modelu, wydzielają się między innymi gazowe produkty zgazowywania. Głębokość strefy reakcji zgazowywania modelu zależy między innymi od właściwości modelu styropianowego oraz parametrów termicznych procesu. Pomiędzy modelem zgazowywanym a ciekłym metalem występuje strefa przejściowa (szczelina ciekła i gazowa). Przepływ ciepła pomiędzy metalem a modelem odbywa się poprzez promieniowanie. Rzadko występuje bezpośredni kontakt metalu z modelem. Wielkość strefy przejściowej jest uzależniona od temperatury metalu i termofizycznych właściwości modelu styropianowego. Model styropianowy opisany jest następującymi parametrami termofizycznymi, charakteryzującymi jego właściwości:

- przewodność cieplna,
- gęstość,
- ciepło właściwe,
- energia aktywacji,
- entalpia.

W celu określenia wpływu energii aktywacji oraz entalpii na proces spalania i wielkość strefy przejściowej, powstającej podczas zalewania, przeprowadzono symulacje dla zmiennych parametrów termofizycznych modelu styropianowego.

Analiza procesu wypełniania wnęki formy z modelem styropianowym

Celem symulacji procesów technologicznych, przy wykorzystaniu nowoczesnych programów komputerowych, jest opracowanie optymalnej technologii wykonania odlewu i eliminacja wad odlewniczych. W przeprowadzonej analizie symulacji przepływu metalu we wnęce formy przeanalizowano zjawiska zachodzące na granicy metal-model styropianowy oraz wpływ parametrów termofizycznych modelu na powstawanie wad w odlewie. Obliczenia przeprowadzono, wykorzystując moduły *LostFoam* oraz *Iron* programu *MAGMASoft*. Uwzględniają one zjawiska zachodzące na granicy styku metalu z modelem zgazowywanym (styropianowym). Badania z wykorzystaniem obliczeń numerycznych wykonano dla różnych parametrów termofizycznych modelu styropianowego scharakteryzowanego wielkościami przedstawionymi na rysunku 2.



Rys. 2. Parametry termofizyczne modelu styropianowego (zrzut z ekranu komputera)

Fig. 2. Thermophysical parameters of foamed polystyrene pattern (screenshot)

Parametr *Activation Energy* charakteryzuje energię potrzebną do zainicjowania procesu spalania modelu styropianowego, natomiast *Reaction Frequency* decyduje o szybkości procesu spalania modelu styropianowego. Są one powiązane równaniem Arrheniusa:

$$\frac{dc}{dt} = k_0 e^{\frac{E_a}{RT}}$$

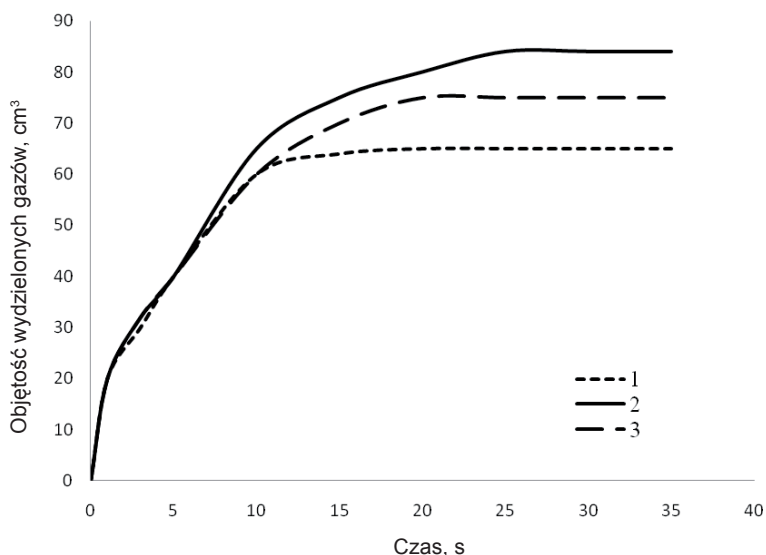
gdzie:

dc/dt - szybkość spalania mol/s
 K_0 - współczynnik szybkości spalania, 1/s
 E_a - energia aktywacji procesu, J/mol
 R - stała gazowa, J/mol K
 T - temperatura, K

Szybkość spalania jest uzależniona od energii potrzebnej do spalania modelu (E_a , J/mol), jak również od współczynnika szybkości procesu (k_0 , 1/s).

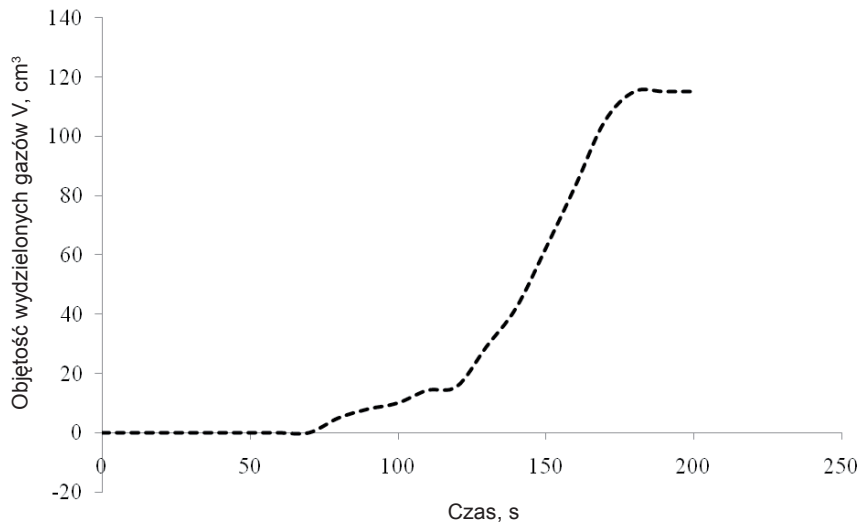
Symulację sposobu zalewania badanych odlewów przeprowadzono pod kątem sprawdzenia prawidłowości wypełnienia formy przez metal, możliwości występowania węzłów cieplnych oraz skuteczności ich zasilania z pokazaniem obszarów w odlewie, w których występować mogą wady.

W Instytucie Odlewnictwa wytypowano do badań zmodyfikowane tworzywa do wykonania modeli zgazowywanych. W laboratoriach akredytowanych Instytutu Odlewnictwa przeprowadzono badania, określające objętość wydzielanych gazów z modelu doświadczalnego w założonej temperaturze. Wyniki badań poszerzają zakres danych parametrów termofizycznych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem zmodyfikowanego urządzenia do badań wydzielalności gazów. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Objętość gazów wydzielonych w temp. 500°C ze zgazowywanego modelu X1, o masie 0,1 g, nr 1 - seria 1 - , nr 2 - seria 2 - , nr 3 - seria 3

Fig. 3. Gas volume emitted at a temperature of 500°C from the evaporative X1 pattern weighing 0.1 g; no. 1 - series 1; no. 2 - series 2; no. 3 - series 3

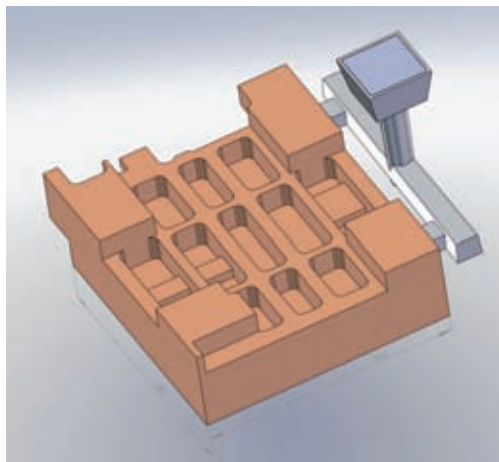


Rys. 4. Objętość gazów wydzielonych w temp. 500°C ze zgasowywanego modelu polistyrenowego o masie 0,1 g

Fig. 4. Gas volume emitted at a temperature of 500°C from the evaporative polystyrene pattern weighing 0.1 g

Opis procesu

Do symulacji komputerowej wytypowano odlew płyty (rys. 5), wykonany z żeliwa sferoidalnego GJS-400, o masie 90 kg i średniej grubości ścianki 60 mm.



Rys. 5. Schemat płyty o masie 90 kg

Fig. 5. Schematic representation of casting a 90 kg weighing plate

Analizę przeprowadzono dla trzech zestawów parametrów termofizycznych charakteryzujących model styropianowy, takich jak: energia aktywacji (*Activation Energy*), współczynnik częstotliwości reakcji (*Reaction Frequency Factor*) i entalpia (*Enthalpy*). Wielkość przyjętych parametrów termofizycznych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry termofizyczne modelu

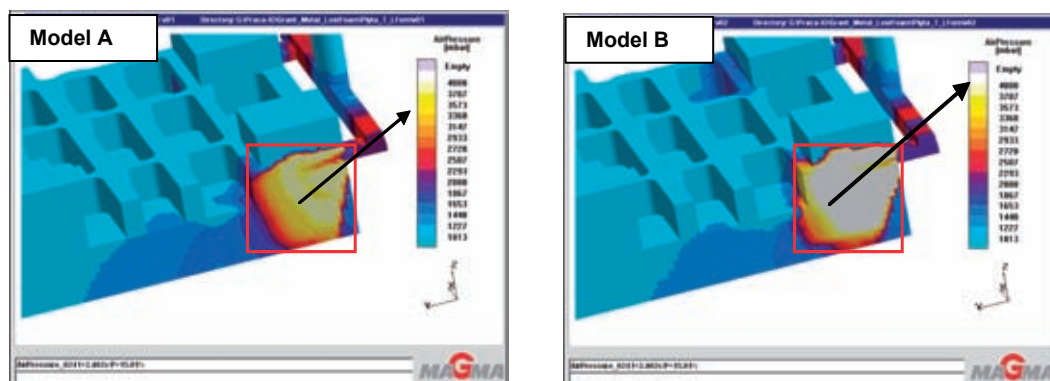
Table 1. Thermophysical parameters of a pattern

Oznaczenie	Wielkość parametru termofizycznego modelu		
	Energia aktywacji, J/mol	Współczynnik częstotliwości reakcji, 1/s	Entalpia, J/kg
Model A	113 044	6.0e+08	499 005
Model B	180 044	6.0e+08	499 005
Model C	113 044	6.0e+08	250 000
Model D	113 044	6.0e+08	725 000

W obliczeniach przeprowadzono analizę wpływu zmiany właściwości termofizycznych modelu, w tym wartości entalpii (*Enthalpy*) i parametru (*Activation Energy*) na przepływ metalu we wnęce formy.

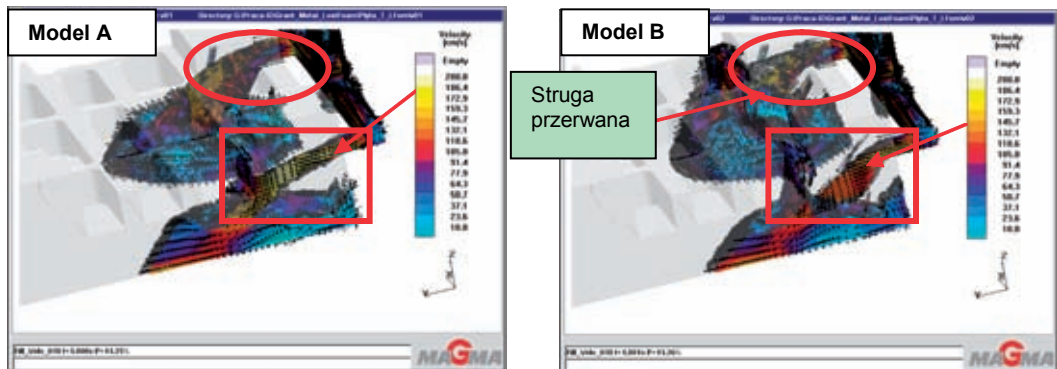
Symulacja procesu zalewania dla odlewu doświadczalnego o masie do 100 kg

Wyniki obliczeń dla modeli styropianowych o właściwościach opisanych przez Model A i B (tabela 1) wskazują, iż dla większej wartości parametru *Activation Energy* zwiększa się wartość ciśnienia gazu (rys. 6) i opór przepływu, a prędkość strugi metalu z wlewu doprowadzającego jest mniejsza (rys. 7) oraz może następować jej przerywanie podczas wypływu z wlewu doprowadzającego metal do wnęki. Mniejsza wartość parametru *Activation Energy* dla modelu styropianowego zmniejsza ciśnienie gazu, co pozwala na zwiększenie prędkości przepływu metalu.



Rys. 6. Rozkład ciśnienia gazu w formie w strefie przejściowej w 2,4 s

Fig. 6. The distribution of gas pressure in moulds transition zone in 2,4 sec.



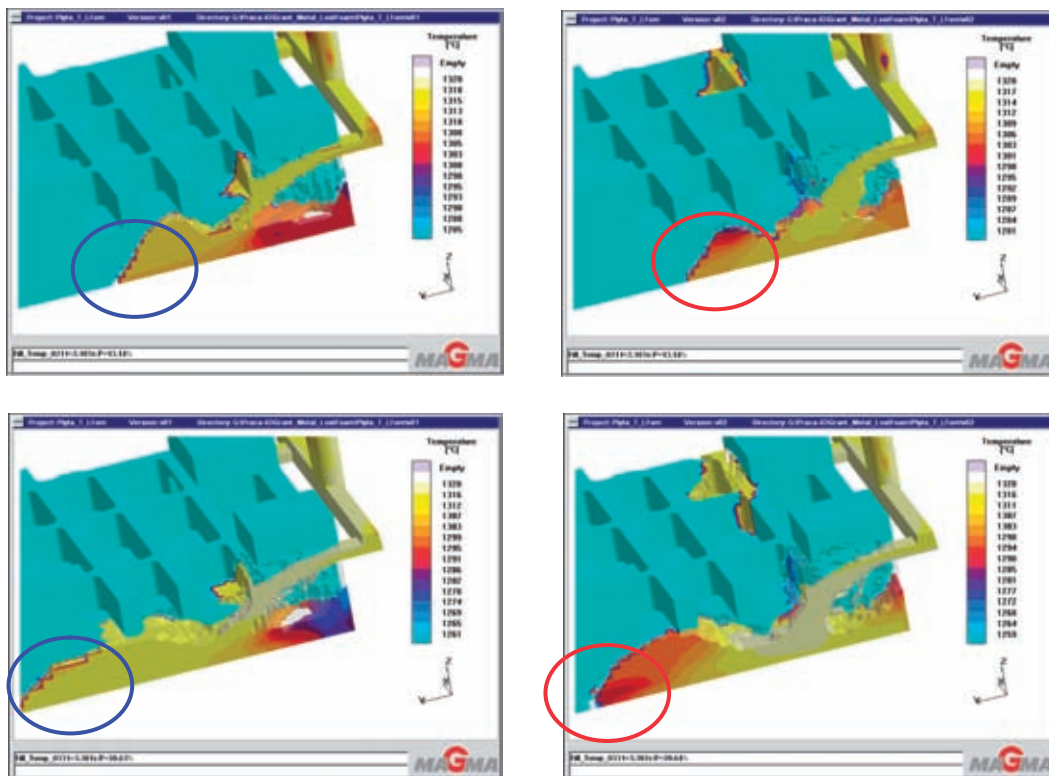
Rys. 7. Rozkład prędkości strugi metalu w 1,8 s podczas wypełniania wnęki formy

Fig. 7. The distribution of metal jet velocity at 1,8 sec. during mould cavity filling

Zmniejszenie prędkości przepływu i zwiększenie ciśnienia gazów w formie wpływa na temperaturę metalu, wypełniającego wnękę formy. Rysunek 8 ukazuje kilka sekwencji rozkładu temperatury w formie podczas zalewania dla wartości parametru *Activation Energy*: 113 044 i 180 000 J/mol. Model styropianowy charakteryzujący się większą wartością energii, którą należy dostarczyć dla zgazowania jednostki objętości, powoduje większy spadek temperatury czoła strugi metalu wpływającego do wnęki formy (rys. 8, Model B).

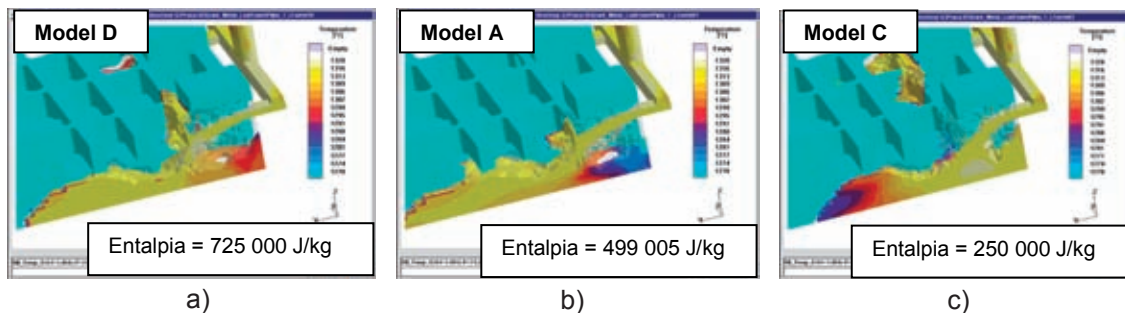
Proces zgazowywania wymusza dostarczenie większej energii. Dostarczanie mniejszej ilości energii powoduje większy spadek temperatury czoła strugi metalu wpływającego do wnęki formy.

Zmiana parametru modelu styropianowego, jakim jest entalpia, również zmienia rozkład temperatury metalu. Podczas procesu spalania modelu styropianowego wydziela się energia cieplna, która oddziałuje na otoczenie, w tym również na strumień płynącego metalu. Kierunek przepływu ciepła w strefie przejściowej jest uzależniony od gradientu temperatury w tym obszarze. W wyniku wydzielania się gazów dochodzi do wzrostu temperatury na skutek dodatkowych procesów ich dopalania. Wzrost temperatury gazów powoduje zmianę kierunku przepływu ciepła od modelu w kierunku ciekłego metalu, gdyż spalające się gazy podwyższają temperaturę i zmienia się gradient. Taki kierunek przepływu energii cieplnej w konsekwencji podwyższa samą temperaturę metalu lub nie powoduje szybkiego jej spadku. Zwiększenie wartości entalpii wskazuje, że energia wewnętrzna układu jest większa a tym samym również ilość wydzielanego ciepła. Potwierdza to przeprowadzona analiza. Na rysunku 9 przedstawiono rozkład temperatury dla trzech wartości entalpii modelu styropianowego. Widać, iż dla wartości najniższej czoło strumienia metalu w 3,3 sekundzie zalewania posiada najniższą temperaturę (Model A), natomiast duża wartość entalpii sprzyja powolnemu spadkowi temperatury (Model D).



Rys. 8. Rozkład temperatury dla różnych wartości parametrów termofizycznych modelu w drugiej i trzeciej sekundzie przepływu metalu (zaznaczono obszary zmian temperatury)

Fig. 8. Temperature distribution for different values of thermophysical parameters of the pattern at 2 and 3 second of the metal flow (note marked areas of temperature changes)



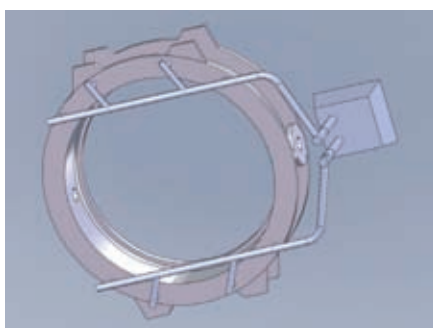
Rys. 9. Rozkład temperatury metalu dla różnych wartości entalpii modelu styropianowego

Fig. 9. Temperature distribution in metal for different values of the foamed polystyrene pattern enthalphy

Uzyskane wyniki wskazują, że im wyższa jest wartość entalpii, tym niższy jest spadek temperatury czoła strugi metalu przesuwającej się we wnęcie formy.

Symulacja procesu zalewania dla odlewu doświadczalnego o masie do 6700 kg

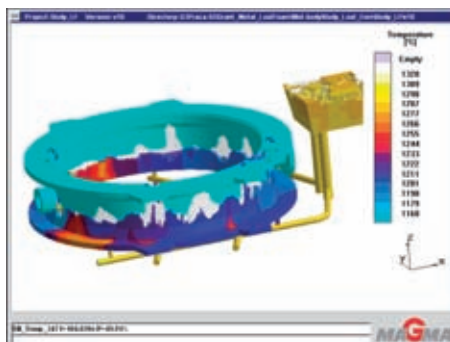
Do analizy wpływu parametrów zalewania, takich jak: kształt układu wlewowego, czas zalewania oraz parametry termofizyczne modelu styropianowego dla odlewów o dużej masie wytypowano odlew pierścienia wykonany z żeliwa sferoidalnego (rys. 10), o masie 6700 kg. Istotne znaczenie na proces przepływu metalu do wnęki formy ma czas zalewania i wielkość układu wlewowego. Technologia zalewania przewiduje wykorzystanie kształtek ceramicznych.



Rys. 10. Schemat odlewu o masie 6700 kg

Fig. 10. Schematic representation of casting a 6700 kg weighing element

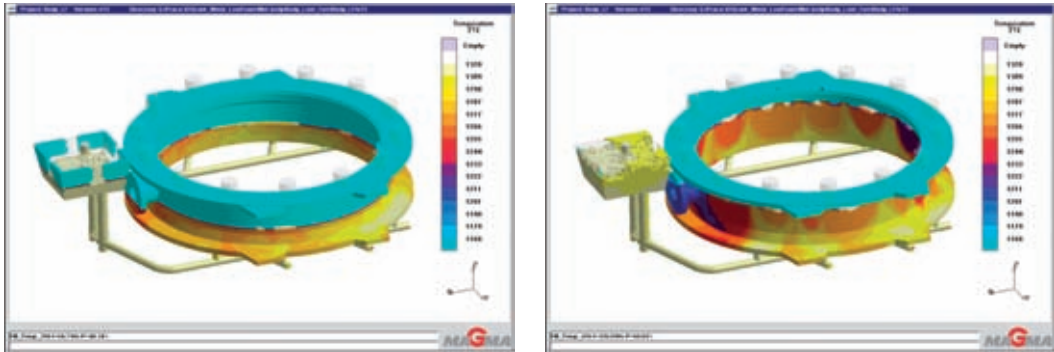
Technologia wykonywania odlewu bez stosowania modelu styropianowego zakładała, iż suma przekrojów wlewów doprowadzających wynosi 157 cm^2 . Czas wypełnienia wnęki formy wynosił około 200 sekund. Przeprowadzona dla tych parametrów analiza odlewania z modelem styropianowym wykazała, że następuje duży spadek temperatury metalu. Na rysunku 11 pokazano, że w 104 sekundzie zalewania temperatura spada poniżej temperatury likwidusu, co może doprowadzić do zbyt wczesnego zakrzepnięcia metalu.



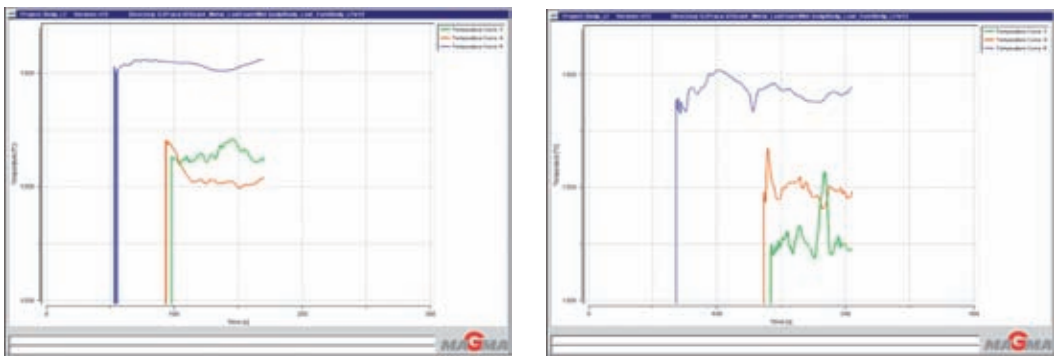
Rys. 11. Rozkład temperatury w 104 s zalewania

Fig. 11. Temperature distribution at 104 sec. of pouring

Zwiększenie przekrojów wlewów doprowadzających do wartości 400 cm² pozwoliło na zapełnienie wnętrza formy bez niebezpieczeństwa dużego spadku temperatury (rys. 12).



Rys. 12. Rozkład temperatury dla układu z powiększonymi wlewami doprowadzającymi
Fig. 12. Temperature distribution for a system with enlarged in-gates



Rys. 13. Rozkład temperatury dla procesu zalewania zwykłego i z modelem styropianowym
Fig. 13. Temperature distribution for a common casting process vs foamed polystyrene patterns

Porównanie rozkładu temperatury w procesie wypełnienia wnętrza formy dla technologii bez i z modelem styropianowym pokazano na rysunku 13. Temperatura zalewania w obu procesach wynosiła 1320°C. W przypadku technologii z modelem styropianowym następuje spadek temperatury. Maksymalna różnica nie przekracza 30°C. Można zaobserwować również zwiększone wahania temperatury podczas procesu zalewania dla technologii z modelem styropianowym. Proces przepływu ciepła pomiędzy metalem a modelem styropianowym jest uzależniony od lokalnego bilansu cieplnego i kierunku jego przepływu (metal-model lub model-metal), co zmienia w istotny sposób rozkład temperatury metalu.

Podsumowanie

1. Na proces przepływu metalu we wnęcie formy z modelem styropianowym, w odlewach o średniej masie, wpływ mają parametry termofizyczne modelu styropianowego.
2. W przypadku odlewów o dużej masie system wlewów doprowadzających powinien być większy niż dla technologii odlewania z pustą wnęką.
3. Można zaobserwować większe lokalne wahania temperatury podczas procesu zalewania dla procesu z pełną formą, które wynoszą około 30°C.
4. Wpływ na lokalne wahania temperatury podczas zalewania ma kierunek przepływu ciepła pomiędzy metalem i modelem.

Podziękowania

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2012 przyznanych w ramach projektu badawczego nr N N507 270736 pt. „Wpływ właściwości materiałów modelowych i formierskich na przebieg procesu odlewania w metodzie modeli zgazowywanych”. Projekt finansowany ze środków na naukę w latach 2009–2010 jako projekt celowy nr 6ZR9 2007C/06941.

Literatura

1. Karwiński A., Haratym R., Żółkiewicz Z.: Określenie możliwości zastosowania modeli zgazowywanych do wykonania odlewów precyzyjnych, TEKA, PAN Lublin, 2009, V. IX, s. 97–103
2. Piech K.: Technologia wykonywania odlewów z zastosowaniem modeli z polistyrenu spienionego, Prace Instytutu Odlewnictwa, 1994, R. 44, z. 3, s. 202–216
3. Shinskij O.I., Zlubko V.A., Brynzea M.: Osobennosti upravlenija processom zapolnenija formy metalom pri lit'e po gazoficiruemym modeljam kolenčatych valov legkovyh avtomobilej. Processy lit'ja, 1995, nr 3, s. 19–29
4. Shinskij O.I. i in.: New Directions in the Theory and Practice of Lost Foam Process, 62 Int. Foundry Congress, Philadelphia 1996, ref. 31, 1-10.
5. Wilk J., Żółkiewicz Z.: Detamination of Optimum Technology in Respect of the Required Values of Casting Quality Parameters by Application of the Weighted Variables Metric, Materials Engineering, Słowacja, Uniwersytet Żilina, 2006, T. 13, no. 3, pp. 89
6. Żółkiewicz Z.: Influence of Thermal Gasification of the Polystyrene Pattern on the Casting Surface, Archives of Foundry - Archiwum Odlewnictwa 2004, R. 4, no. 11, pp. 332–333
7. Żółkiewicz Z., Żółkiewicz M., Jankowski W., Wilk J.: Sterowanie procesem krzepnięcia odlewów w technologii modeli cieplnie zgazowywanych, Archiwum Odlewnictwa, 2006, R. 6, nr 18 (2/2), s. 219–224
8. Żółkiewicz Z., Baliński A., Żółkiewicz M.: The Lost Foam Technology - Technological Engineering 2007, Żilina, Słowacja, T. IV, no. 1, pp. 105–106
9. Żółkiewicz Z., Żółkiewicz M.: Pattern evaporation process, Archives of Foundry Engineering, Issue 1, Katowice-Gliwice, January-March 2007, Vol. 7, pp. 49–52
10. Żółkiewicz Z., Maniowski Z.: Wybrane procesy odlewnicze w aspekcie ochrony środowiska, Prace Instytutu Nafty i Gazu, Kraków 2009, nr 164, s. 235–342
11. Żółkiewicz Z., Żółkiewicz M.: Lost Foam Process – the Chance for Industry, TEKA, PAN Lublin, 2009, Vol. 9, pp. 431–436
12. Żółkiewicz Z., Żółkiewicz M.: Charakterystyka zgazowywanego tworzywa modelu, Archives of Foundry Engineering, 2010 - w druku