

PROCES WYKONYWANIA MODELI WYTAPIANYCH –
SYMULACJA KOMPUTEROWA

MAKING INVESTMENT PATTERNS – COMPUTER SIMULATION

Marcin Małysza, Jerzy Stachańczyk, Stanisław Pysz

Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowej i wizualizację procesu wykonywania modeli wytapianych. Symulację komputerową przeprowadzono przy zmiennej lepkości masy modelowej i zaprogramowanych parametrach techniczno-technologicznych wykonania modelu – ciśnienie wprowadzenia masy modelowej do matrycy, usytuowanie i wymiary układu zasilającego, geometria przepływu. Przedstawione wyniki to efekt zapoczątkowanych badań symulacyjnych procesu wykonywania modeli.

Słowa kluczowe: symulacja komputerowa, modele wytapiane, lepkość dynamiczna, układ zasilający, geometria przepływu

Abstract

The results of computer simulation and visualisation of the process of making investment patterns are presented. Computer simulation was carried out on pattern materials of variable viscosity, with preset technical and technological parameters of the pattern-making process, including pressure under which the wax composition was introduced to the die, the configuration and dimensions of the feeding system, and the flow geometry. The results presented here are an outcome of the started simulation programme for the pattern-making process.

Key words: computer simulation, investment patterns, dynamic viscosity, feeding system, flow geometry

Wstęp

Proces wykonywania modeli (wypełniania wnęki formy metalowej – matrycy, masą modelową woskową) to zagadnienie dotychczas w niewielkim stopniu analizowane ze względu na brak odpowiedniej aparatury umożliwiającej opisanie zjawisk występujących w trakcie przebiegu tej operacji technologicznej.

Na proces wypełniania matrycy mają wpływ:

- właściwości masy modelowej,
- ciśnienie pod jakim masa modelowa jest wprowadzana do formy,
- parametry układu zasilającego (wymiary otworu wtryskowego, jego usytuowanie w stosunku do kształtu i wymiaru wnęki),
- geometria strumienia masy modelowej przemieszczającego się we wnęcie formy.

Masa modelowa służąca do produkcji modeli to skomplikowana mieszanina różnych związków chemicznych (węglowodory, kwasy tłuszczowe, woski syntetyczne, wypełniacze organiczne, żywice syntetyczne, modyfikatory, barwniki), co stwarza różnorodną kombinację jej składu o określonych właściwościach [1]. Taka budowa powoduje również nietypową zmianę skupienia masy modelowej ze stanu stałego w ciekły charakteryzującą się brakiem wyraźnie wyznaczonej temperatury topnienia i występowania stanów przejściowych (masa o konsystencji pasty) [2].

Aktualnie prowadzone badania właściwości fizykochemicznych (temperatura topnienia, temperatura krzepnięcia, penetracja), reologicznych (lepkość) i technologicznych (skurcz liniowy, odkształcenia, wytrzymałość na zginanie) nie pozwalają na opis procesu wypełniania wnęki matrycy masą modelową [2].

Według badań [3] na przebieg procesu wypełniania (wtrysku) formy mają wpływ lepkość, napięcie powierzchniowe, ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne masy modelowej oraz współczynnik przenikania ciepła na granicy masa modelowa-matryca.

Podstawowe właściwości opisujące masę modelową (lepkość, napięcie powierzchniowe) to parametry zależne od temperatury.

Niezależnie od wymienionych właściwości masy modelowej należy w rozważaniach uwzględnić przewodnictwo cieplne formy metalowej (matrycy).

Inne czynniki odpowiadające za proces wypełniania to przede wszystkim konstrukcja formy metalowej, w której szczególnie uwagę należy zwrócić na:

- materiał formy (stal, stopy aluminium, stopy niskostopowe, tworzywa sztuczne),
- system zasilania (kształt i wielkość wlewu doprowadzającego, dysza wtryskowa oraz jej usytuowanie w stosunku do wnęki formy),
- system chłodzenia modelu w formie.

Aktualnie stosowane urządzenia wtryskowe (wtryskarki) pracujące w systemie obsługi ręcznej lub automatycznej pozwalają na przygotowanie masy modelowej o określonej temperaturze wtrysku z dokładnością $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$, przy ciśnieniu wtrysku w zakresie 0,35–7,0 MPa, w takich warunkach można wykonać modele o masie dochodzącej nawet do 15 kg.

Dotychczasowy system projektowania procesu technologicznego wytwarzania modeli (wypełniania masą modelową wnęki formy metalowej) opierał się na znajomości właściwości fizykochemicznych i technologicznych mas oraz wykorzystaniu typowych rozwiązań projektowo-konstrukcyjnych.

W przedstawionym artykule zostały zaprezentowane wstępne wyniki badań procesu wypełniania, do których została wykonana symulacja komputerowa przeprowadzona przy użyciu programu Flow3D [3, 4].

Program CFD – Flow3D (ang. *Computational Fluid Dynamics*) posiada zaimplementowaną bardzo dużą ilość algorytmów do opisu różnych zjawisk fizycznych. Algorytm wykorzystany w symulacji wtrysku masy modelowej opiera się na twierdzeniach przeniesienia masy i pędu, wyrażonych m.in. następującym równaniem różniczkowym:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

gdzie: V_F – objętość elementarna, w której może nastąpić przepływ, m^3

A_x, A_y, A_z – powierzchnia elementarna, w której może nastąpić przepływ, m^2

ρ – gęstość cieczy, $kg \cdot m^{-3}$

R_{DIF} – współczynnik dyfuzji, $m^2 \cdot s^{-1}$

R_{SOR} – źródło medium, $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$

u, v, w – składowe prędkości, m

ξ – liczba używana w perspektywie końca twierdzenia Taylora, która mieści się w granicach a i b .

Kolejnym algorytmem pozwalającym na urealniony opis przepływu medium o wysokiej lepkości, jaką jest masa modelowa jest model Carreau, wykorzystywany jest dla cieczy nienewtonowskich, w których właściwości reologiczne ulegają zmianie pod wpływem sił powstających w warstwach przyściennych, na które działa siła skierowana przeciwnie do kierunku przepływu [5].

$$\mu = \mu_\infty + \frac{\mu_0 E_T - \mu_\infty}{\lambda_{00} + \left[\lambda_0 + (\lambda_1 E_T)^2 2 \mathbf{e}_{ij} \mathbf{e}_{ij} \right]^{\frac{1-n}{2}}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{2 \mathbf{e}_{ij} \mathbf{e}_{ij}}} \quad (2)$$

gdzie: $\mu_\infty, \mu_0, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ – tensor szybkości odkształceń,

E_T – prędkość odkształcenia w funkcji temperatury, s^{-1}

n – stała,

oraz

$$\mathbf{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$E_T = \exp \left[a \left(\frac{T}{T-b} - c \right) \right] \quad (4)$$

a, b, c – wartości stałe,

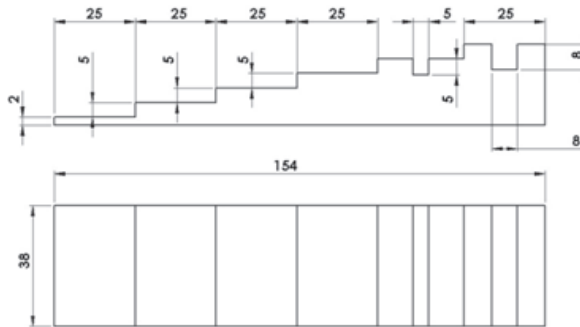
T – temperatura masy modelowej.

Badania własne

Założenia

W artykule przedstawiono symulację numeryczną procesu wypełniania masą modelową wnęki formy metalowej.

Symulację przeprowadzono na przykładzie modelu przedstawionego na rysunku 1 – model schodkowy o zmiennej grubości ścianki i objętość wnęki 79,3 cm³ [6].

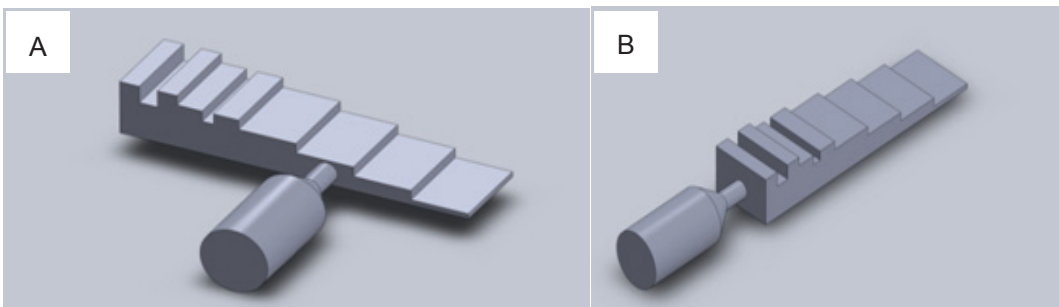


Rys. 1. Model schodkowy

Fig. 1. Stepped pattern

W symulacji uwzględniono:

- dwa warianty usytuowania dyszy wtryskowej:
 - układ A w połowie długości wnęki formy (wymiar 77 mm), co gwarantuje dwustronny przepływ masy modelowej;
 - układ B w połowie szerokości wnęki formy (wymiar 19 mm) od strony największej wysokości modelu schodkowego 24 mm, w tym przypadku uzyskujemy gwarancję jednokierunkowego przepływu masy modelowej.



Rys. 2. Usytuowanie dysz wtryskowych – wariant A i B

Fig. 2. The layout of injection nozzles – variants A and B

- dwa rodzaje mas modelowych (1, 2) różniące się lepkością dynamiczną $\eta_1 = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\eta_2 = 100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Przyjęto założenie, że lepkość dynamiczna jest dla danej masy modelowej, w ustalonej temperaturze, stała niezależnie od działającego w procesie wypełniania wnęki formy naprężenia ścinającego. Przy takiej interpretacji istnieją warunki umożliwiające wstępną ocenę procesu, takie jak:

- różne ciśnienie umożliwiające przepływ masy modelowej – przyjęto wartości $p_1 = 50 \text{ kPa}$, $p_2 = 175 \text{ kPa}$, $p_3 = 350 \text{ kPa}$.

Celowo przyjęto niskie wartości ciśnienia, ponieważ istnieje wówczas możliwość lepszej oceny procesu przepływu masy i wypełnienia wnęki formy.

- różne średnice dysz wtryskowych – wariant usytuowania A i B, przyjęto wymiary dysz: $\Phi = 8 \text{ mm}$, $\Phi = 10 \text{ mm}$, $\Phi = 12 \text{ mm}$.

Wielowariantowa symulacja komputerowa procesu przepływu masy modelowej i wypełnienia formy metalowej pozwoli na szczegółową analizę procesu oraz jego wizualizację w przestrzeni trójwymiarowej wnętrza matrycy.

Przeprowadzone badania

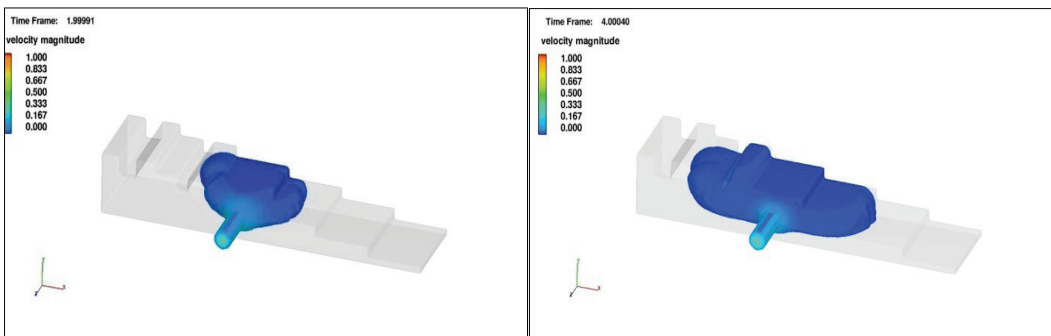
Symulacja przepływu przy zmiennej wielkości średnicy i usytuowaniu dyszy wtryskowej

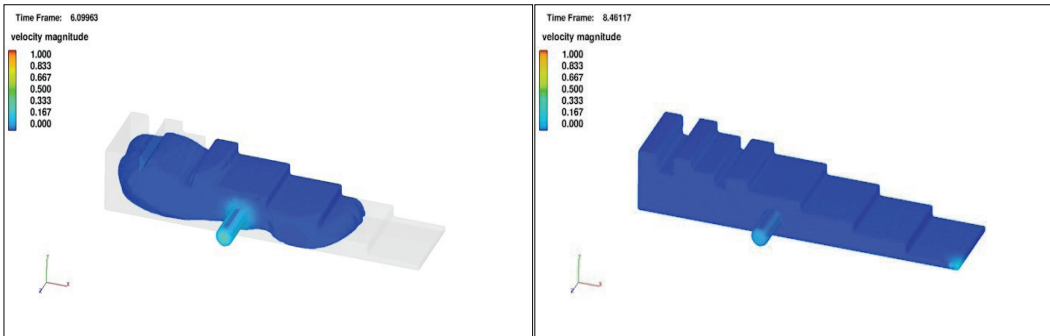
Badania przeprowadzono przy stałych wartościach lepkości dynamicznej $\eta = 100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ lub $50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ i ciśnienia 350 kPa , zmiennych parametrach usytuowania i różnych wymiarach dysz. Wyniki poszczególnych wizualizacji przedstawiono na rysunkach 3–12.

W pierwszym etapie symulacji komputerowej i wizualizacji procesu wypełniania wnęki formy metalowej przyjęto parametry:

- usytuowanie dyszy wtryskowej – wariant A,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 8 \text{ mm}$ (rys. 3),
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 10 \text{ mm}$,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 12 \text{ mm}$.

Wyniki symulacji dla dysz o średnicy $\Phi = 10 \text{ mm}$ i $\Phi = 12 \text{ mm}$ przedstawiono w formie graficznej – wykres (rys. 5).





Rys. 3. Wizualizacja wypełnienia matrycy, dysza $\Phi = 8$ mm, wariant A – czas wypełnienia $t = 8,46$ s, natężenie przepływu $9,4$ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3. Visualisation of the die filling process, nozzle $\Phi = 8$ mm, variant A – filling time $t = 8.46$ s, flow rate 9.4 $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Dzięki wizualizacji w przestrzeni trójwymiarowej można zaobserwować sposób przemieszczania się masy modelowej wewnątrz matrycy, w początkowym etapie masa modelowa rozprawdzana jest równomiernie. Jest to wynik usytuowania dyszy pozwalający na szybsze wypełnienie schodków o mniejszej grubości. Końcowy etap przebiega na drodze przepchnięcia masy modelowej do schodka o najmniejszej grubości ścianki. Wyraźnie zauważalny jest wpływ średnicy dyszy wtryskowej na czas wypełnienia.

W kolejnej wersji badania (rys. 4) procesu wypełniania wnęki formy metalowej (matrycy) przyjęto parametry:

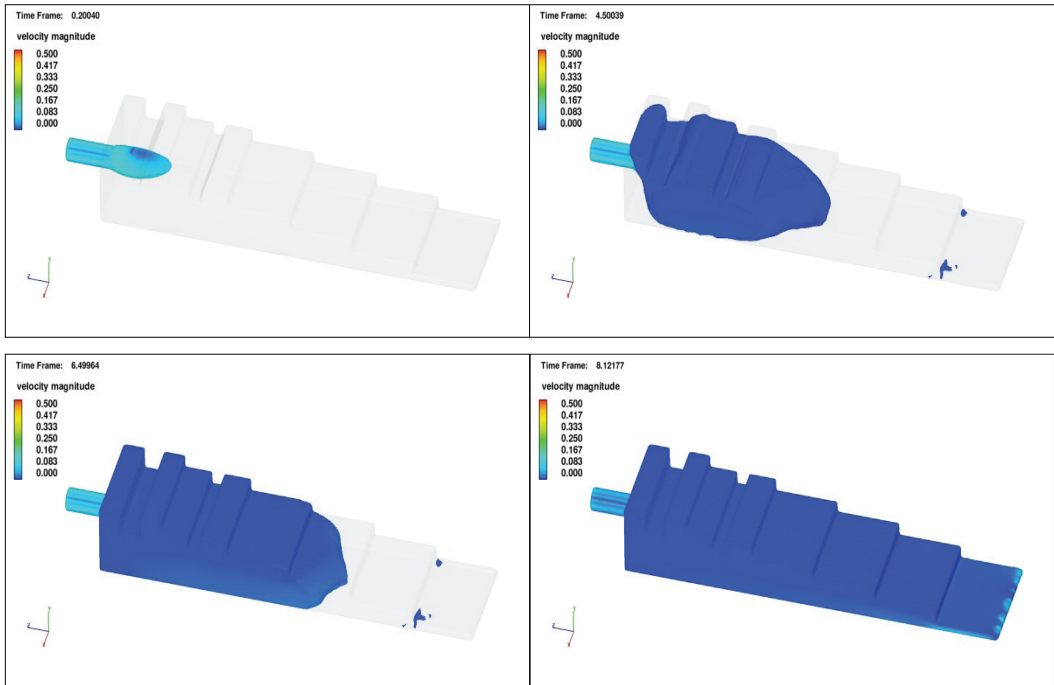
- usytuowanie dyszy wtryskowej – wariant B,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 8$ mm (rys. 4),
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 10$ mm,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 12$ mm.

Wyniki symulacji dla dysz o średnicy $\Phi = 10$ mm i $\Phi = 12$ mm przedstawiono w formie graficznej – wykres (rys. 5).

W każdym przypadku (rys. 4) masa modelowa umiejscowiona początkowo w grubych przekrojach wnęki matrycy pod wpływem ciśnienia zostaje przemieszczona do mniejszych przekrojów (jednostronny kierunek przepływu), widoczna jest wyraźna zależność czasu wypełnienia od średnicy dyszy wtryskowej.

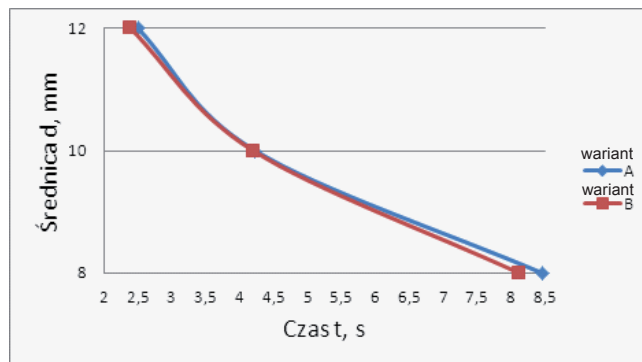
Przebieg symulacji, w której współczynnik lepkości przyjęto $\eta = 100$ $\text{Pa} \cdot \text{s}$, pozwolił na wizualizację zachowania się masy modelowej o założonych parametrach podczas jej wtrysku do matrycy pod ciśnieniem $p = 350$ kPa. Analiza numeryczna pozwala na ocenę wydajności pracy, umożliwia wprowadzenie zmian w konstrukcji matrycy, co przekłada się na zmniejszenie czasu i kosztów opracowania technologii.

Na rysunku 5 zestawiono czas wypełnienia matrycy dla wariantu A i B w zależności od średnicy dyszy i jej usytuowania.



Rys. 4. Wizualizacja wypełnienia matrycy, dysza $\Phi = 8$ mm, wariant B – czas wypełnienia $t = 8,23$ s, natężenie przepływu $9,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 4. Visualisation of the die filling process, nozzle $\Phi = 8$ mm, variant B – filling time $t = 8.23$ s, flow rate $9.6 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 5. Czas wypełnienia matrycy w funkcji średnicy dyszy

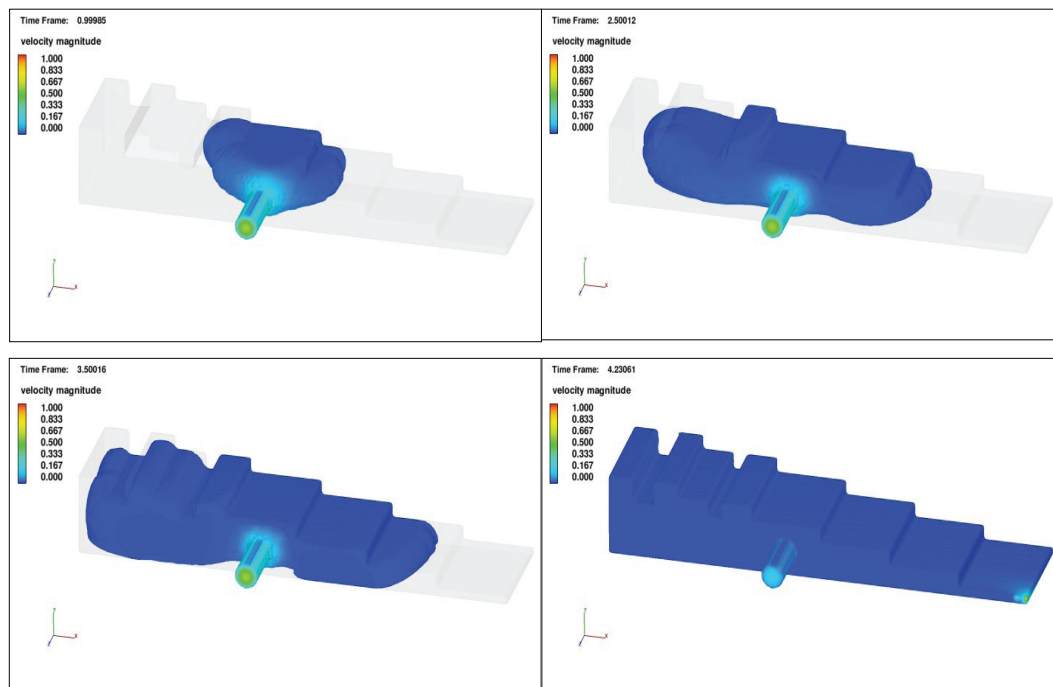
Fig. 5. Die filling time in function of the nozzle diameter

Analiza rysunku 5 pozwala na stwierdzenie, że usytuowanie dyszy wtryskowej ma praktycznie minimalny wpływ na czas wypełnienia matrycy. Decydującym parametrem jest jej wymiar (średnica).

Kolejna wersja symulacji została przeprowadzona z uwzględnieniem współczynnika lepkości $\eta = 50 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, pozostałe parametry tzn. ciśnienia wtrysku, usytuowanie i średnice dysz przyjęto analogicznie jak w poprzednich wariantach symulacji.

Na rysunku 6 przedstawiono proces wypełnienia wnętrza formy metalowej przy parametrach:

- usytuowanie dyszy wtryskowej – wariant A,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 8 \text{ mm}$ (rys. 6),
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 10 \text{ mm}$,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 12 \text{ mm}$.



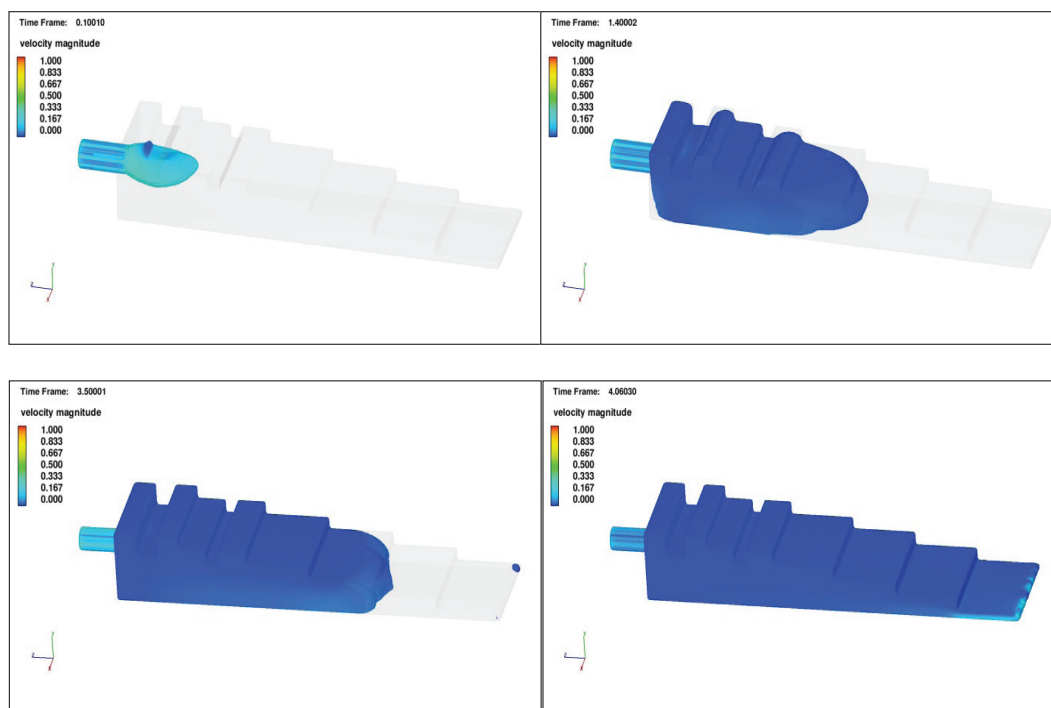
Rys. 6. Wizualizacja wypełnienia matrycy, dysza $\Phi = 8 \text{ mm}$, wariant A – czas wypełnienia $t = 5,23 \text{ s}$, natężenie przepływu $15,2 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 6. Visualisation of the die filling process, nozzle $\Phi = 8 \text{ mm}$, variant A – filling time $t = 5.23 \text{ s}$, flow rate $15.2 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Wyniki symulacji dla dysz o średnicy $\Phi = 10$ mm i $\Phi = 12$ mm przedstawiono w formie graficznej – wykres (rys. 8).

Rysunek 7 przedstawia wizualizację wypełnienia wnętrza formy metalowej przy parametrach:

- usytuowanie dyszy wtryskowej – wariant B,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 8$ mm (rys. 7),
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 10$ mm,
- średnica dyszy wtryskowej $\Phi = 12$ mm.

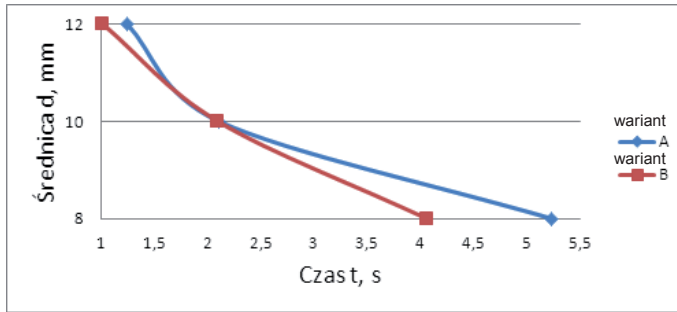


Rys. 7. Wizualizacja wypełnienia matrycy, dysza $\Phi = 8$ mm, wariant B – czas wypełnienia $t = 4,06$ s, natężenie przepływu $19,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 7. Visualisation of the die filling process, nozzle $\Phi = 8$ mm, variant B – filling time $t = 4.06$ s, flow rate $19.5 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Wyniki symulacji dla dysz o średnicy $\Phi = 10$ mm i $\Phi = 12$ mm przedstawiono w formie graficznej – wykres (rys. 8).

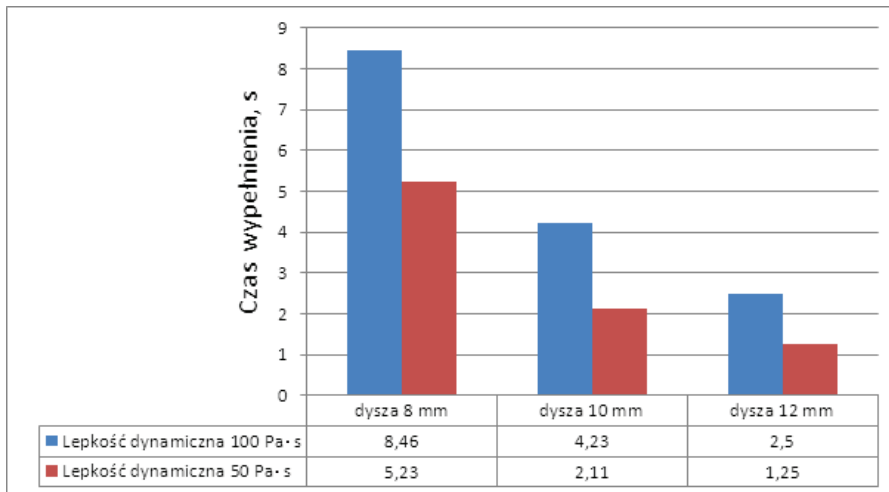
Na rysunku 8 zestawiono czasy wypełnienia matrycy dla wariantu A i B w zależności od usytuowania dyszy wtryskowej i jej średnicy.



Rys. 8. Czas wypełnienia matrycy w funkcji średnicy dyszy

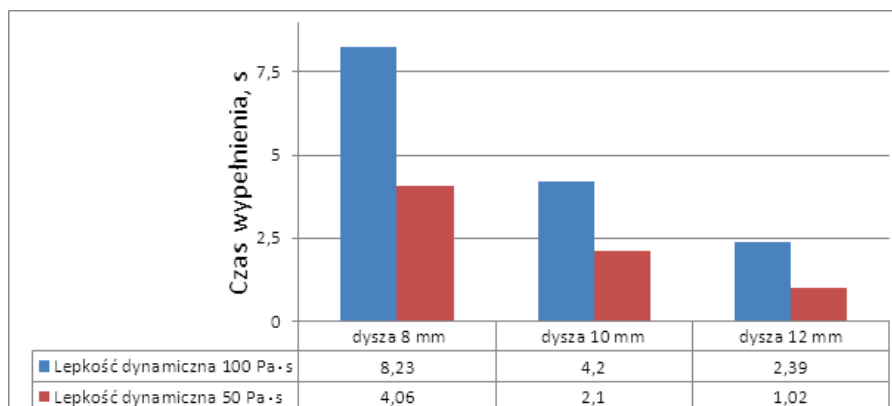
Fig. 8. Die filling time in function of the nozzle diameter

Na podstawie uzyskanych wyników przeanalizowano wpływ lepkości na czas wypełnienia wnęki formy metalowej i natężenie przepływu. Na rysunkach 9–12 przedstawiono czasy wypełnienia wnęki formy metalowej oraz natężenie przepływu dla wartości lepkości 50 Pa·s i 100 Pa·s w wariancie usytuowania dyszy A i B, przy zmiennych wymiarach średnicy (8, 10, 12 mm).



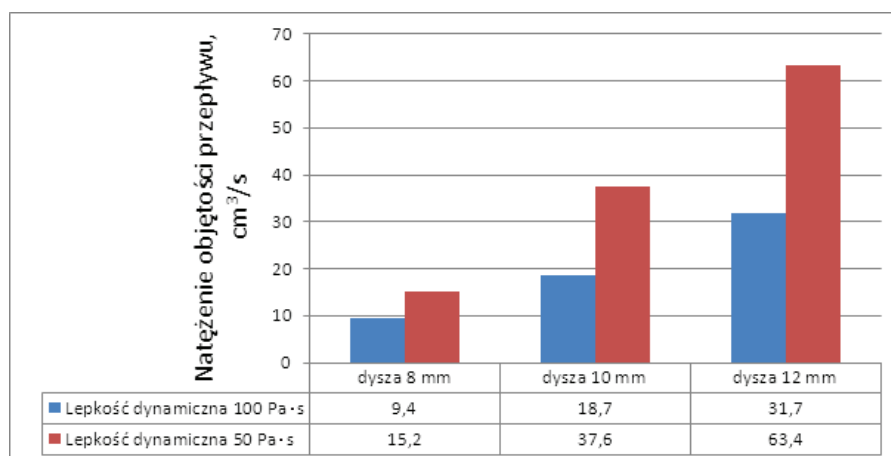
Rys. 9. Zależność czasu wypełnienia formy metalowej od lepkości masy modelowej i średnicy dyszy wtryskowej. Usytuowanie dyszy – wariant A

Fig. 9. Die filling time vs pattern material viscosity and injection nozzle diameter. Nozzle location – variant A



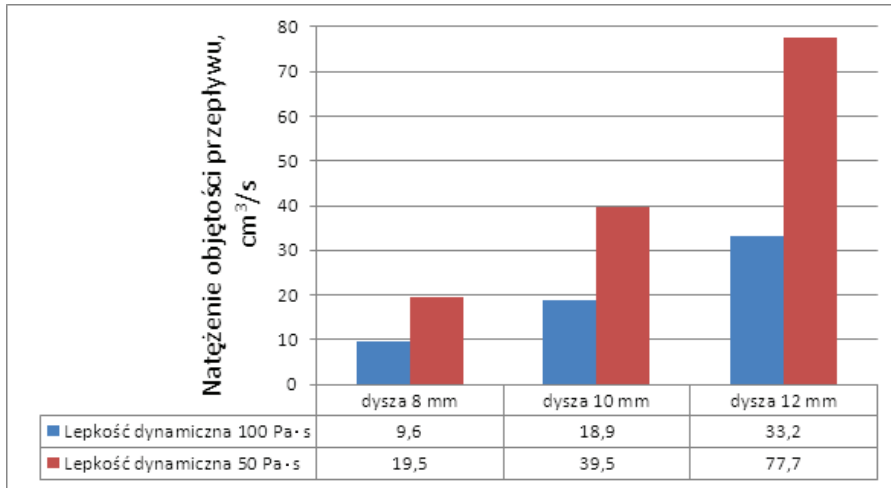
Rys. 10. Zależność czasu wypełnienia formy metalowej od lepkości masy modelowej i średnicy dyszy wtryskowej. Usytuowanie dyszy – wariant B

Fig. 10. Die filling time vs pattern material viscosity and injection nozzle diameter. Nozzle location – variant B



Rys. 11. Zależność natężenia objętości przepływu od lepkości dynamicznej masy modelowej i średnicy dyszy wtryskowej. Usytuowanie dyszy – wariant A

Fig. 11. Flow rate vs dynamic viscosity of pattern material and nozzle diameter. Nozzle location – variant A



Rys. 12. Zależność natężenia objętości przepływu od lepkości dynamicznej masy modelowej i średnicy dyszy wtryskowej. Usytuowanie dyszy – wariant B

Fig. 12. Flow rate vs dynamic viscosity of pattern material and nozzle diameter. Nozzle location – variant B

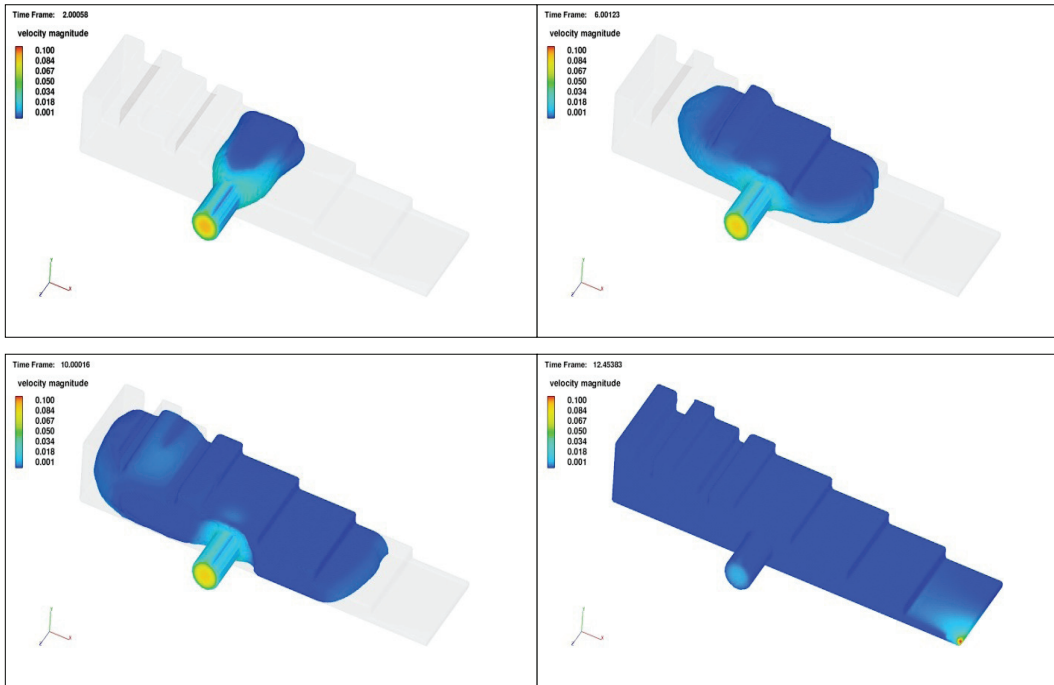
Dane prezentowane na wykresach (rys. 9–12) wskazują na wyraźny wpływ lepkości masy modelowej na przebieg procesu wypełnienia formy metalowej.

Symulacja przepływu masy modelowej przy zmiennym ciśnieniu wypełnienia wnętrza formy

Symulację przepływu masy modelowej oraz wizualizację wypełnienia wnętrza formy przeprowadzono przy następujących parametrach:

- stałych: lepkość dynamiczna masy modelowej $\eta = 100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, średnica dyszy $\Phi = 12 \text{ mm}$,
- zmiennych: usytuowanie dyszy – wariant A i B,
- ciśnienie robocze w trakcie wypełnienia: $p_1 = 50 \text{ kPa}$, $p_2 = 175 \text{ kPa}$, $p_3 = 350 \text{ kPa}$.

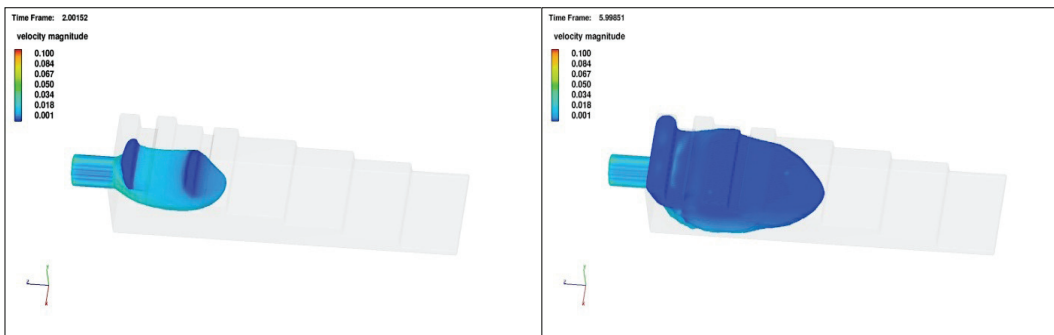
Na rysunku 13 przedstawiono symulację dla wariantu A i ciśnienia p_1 .

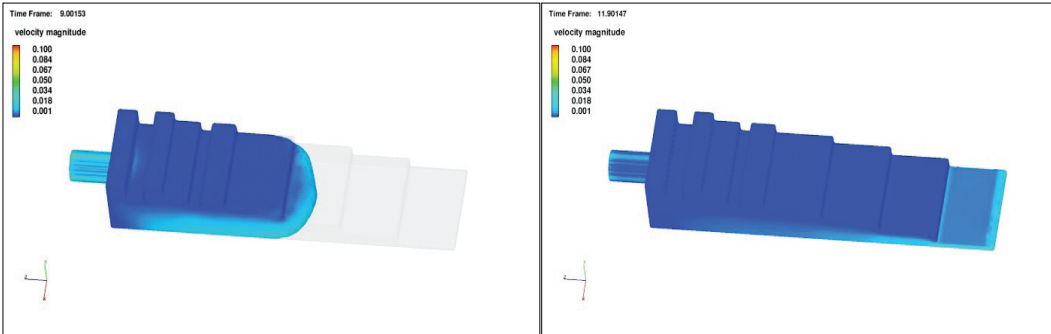


Rys. 13. Wizualizacja wypełnienia matrycy – wariant A: ciśnienie $p_1 = 50$ kPa, czas wypełnienia 12 s, natężenie przepływu $6,6 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 13. Visualisation of the die filling process – variant A: pressure $p_1 = 50$ kPa, filling time 12 s, flow rate $6.6 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Na rysunku 14 przedstawiono symulację dla wariantu B i ciśnienia p_1 .





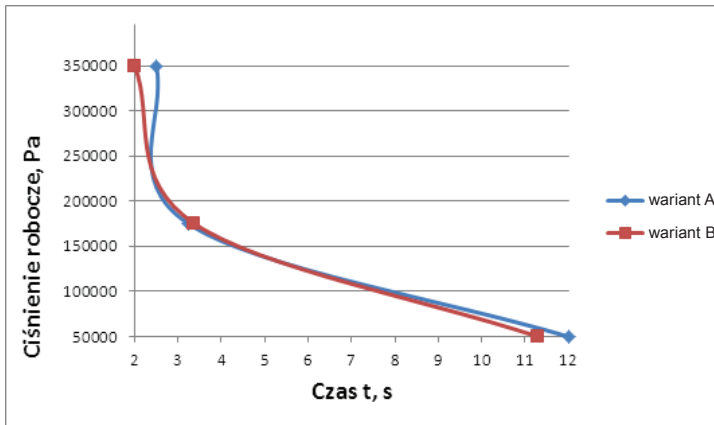
Rys. 14. Wizualizacja wypełnienia matrycy – wariant B: ciśnienie $p_1 = 50 \text{ kPa}$, czas wypełnienia 11,5 s, natężenie przepływu $6,85 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 14. Visualisation of the die filling process – variant B: pressure $p_1 = 50 \text{ kPa}$, filling time 11.5 s, flow rate $6.85 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Wyniki symulacji dla ciśnienia p_2 i p_3 – wariant A i B, przedstawiono w formie graficznej – wykres (rys. 15).

Na rysunku 15 przedstawiono zależność czasu wypełnienia matrycy od ciśnienia roboczego, z którego wynika jednoznacznie, że:

- ze wzrostem ciśnienia czas wypełnienia matrycy zmniejsza się,
- czas wypełnienia praktycznie nie zależy od usytuowania dyszy wtryskowej.



Rys. 15. Zależność czasu wypełnienia matrycy od ciśnienia roboczego

Fig. 15. Die filling time vs working pressure

Dobór ciśnienia roboczego wpływa na optymalizację czasu wypełnienia matrycy. Symulacja komputerowa pozwala na analizę i optymalizację parametrów opisujących i wpływających na proces technologiczny. Przedstawione na wykresie dane pokazują różnicę w czasie wypełnienia matrycy w zależności od umiejscowienia dyszy wtryskowej, jak i wartości ciśnienia roboczego.

Podsumowanie

Symulacja komputerowa procesu wykonywania modelu wytapianego, przepływu masy modelowej i wypełnienia wnęki formy metalowej (matrycy) pozwala na przeanalizowanie wpływu czynników fizykochemicznych (lepkość dynamiczna) i parametrów konstrukcyjno-technologicznych (ciśnienie robocze, usytuowanie i średnica dyszy wtryskowej) na przebieg operacji wytwarzania modeli wytapianych.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wartość lepkości dynamicznej masy modelowej, a tym samym jej temperatura decyduje o przebiegu procesu wytwarzania modelu wytapianego. Ze wzrostem lepkości wydłuża się czas wykonywania, a tym samym maleje objętościowe natężenie przepływu i wydajność urządzenia wtryskowego;
- nie stwierdzono zależności pomiędzy usytuowaniem dysz wtryskowych w formie metalowej (matrycy) a przebiegiem procesu, natomiast wymiary (średnica) wpływają w sposób zasadniczy na efektywność wykonywania modeli.

Przedstawiona praca to pierwszy etap badań opisujących proces wykonywania modeli wytapianych, w dalszych etapach realizacji należy uwzględnić zależność lepkości do naprężenia ścinającego.

Podziękowania

Publikację opracowaną na potrzeby realizacji projektu celowego nr 04569/C. ZR7-6/2010 pt. „Opracowanie i zastosowanie mas modelowych w aspekcie poprawy wydajności jakości i ekologii procesu wytwarzania odlewów precyzyjnych”.

Literatura

1. Pabiś R., Stachańczyk J.: *Badania kinetyki krzepnięcia i stygnięcia masy modelowej w matrycy*. Prace Instytutu Odlewnictwa, 2011, T. 51, nr 2, s. 45–52.
2. Hancock P.: *Wax testing – now and the future*. Foundry Trade Journal International, January/February 2011, Vol. 185, No. 3681, pp. 10–11.
3. Gebelin J.-C.: *Simulation of die filling of the wax injection process: Part I models for material behavior*. IRC Materials Processing, University of Birmingham, August 2004, Vol. 35, No. 4.
4. Gebelin J.-C., Jolly M.R., Cendrowicz A.M., Cire J., Blackburn S.: *Simulation of die filling for the wax injection process: Part II numerical simulation*. IRC Materials Processing, University of Birmingham, October 2004, Vol. 37, No. 6.
5. *Flow 3D: User manual v10.0*, 2010.
6. Sabau S.A., Viswanathan S.: *Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting*. Materials Science and Engineering A362, 2003, pp. 125–134.
7. Kosour V., Horáček M.: *Numerická simulace vstříkování voskové směsi pro výrobu modelů*, Slévárnoství, 2010, T. 58, nr 11–12, pp. 374–378.

