

# Komputerowe modelowanie procesu wtryskiwania wspomaganego gazem – symulacje komputerowe a praktyka

Jacek Nabiałek<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2020.11.10](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2020.11.10)

**Streszczenie:** Współczesne programy komputerowe przeznaczone do symulacji procesów przetwórstwa polimerów pozwalają na prowadzenie obliczeń numerycznych dotyczących przepływu wtryskiwanego tworzywa w gnieździe formującym nie tylko w klasycznym procesie wtryskiwania. Umożliwiają też symulowanie niestandardowych technologii wtryskiwania, np. wtryskiwania wspomaganego gazem. Na podstawie przedstawionych wyników symulacji komputerowej oraz rzeczywistego wtryskiwania wspomaganego gazem oceniono zgodność obliczeń numerycznych z rezultatami prób praktycznych. Wykazano, że zaawansowane algorytmy komputerowych programów symulacyjnych umożliwiają modelowanie zjawisk specyficznych dla rozpatrywanej metody wtryskiwania. Umiejętność prowadzenia symulacji procesów przetwórstwa polimerów (w tym wtryskiwania wspomaganego gazem) pozwala na skrócenie czasu koniecznego do wdrożenia wyprasek do produkcji, eliminację błędów konstrukcyjnych oraz poszerzenie wiedzy na temat przebiegu rzeczywistego procesu. W pracy skupiono się na procesie wtryskiwania wspomaganego gazem metodą całkowitego wypełnienia gniazda formującego w początkowej fazie wtrysku płynnego tworzywa. Szczególną uwagę skupiono na procesie formowania się kanału gazowego, omówiono też parametry decydujące o jego wielkości i kształcie.

**Słowa kluczowe:** wtryskiwanie wspomaganie gazem, symulacje procesów przetwórstwa, weryfikacja doświadczalna, formowanie kanału gazowego.

## Computer modeling of the gas assisted injection molding process – computer simulations *vs.* practice

**Abstract:** Modern computer programs for simulation of polymer processing allow to conduct numerical calculations on the movement of the injected material, not only in the classical injection molding process. It is possible to simulate non-standard injection methods, *e.g.* gas assisted injection process. The paper presents the results of computer simulations and real gas-assisted injection. These results were compared and the compliance of numerical calculations with the results of practical tests was assessed. It has been shown that advanced algorithms of computer simulation programs enable modeling of phenomena specific to the injection method under consideration. The ability to conduct simulations of polymer processing processes (including gas-assisted injection) allows to shorten the time of implementation of molds for production, eliminate construction errors and expanding knowledge about the course of the actual process. The work focuses on the gas-assisted injection process by filling the forming cavity entirely in the melt filling phase. Particular attention was paid to the gas channel formation process and the parameters that determine its shape and dimensions.

**Keywords:** gas assisted injection molding, processing simulation, experimental verification, gas channel formation.

Technologia wtryskiwania wspomaganego gazem umożliwia wytwarzanie wyprasek pustych w części rdzeniowej, charakteryzujących się mniejszą masą niż ich analogi wytwarzane w procesie wtryskiwania kon-

wencjonalnego. Wypraski wytworzone w procesie wtryskiwania wspomaganego gazem charakteryzują się dużą sztywnością i korzystnymi właściwościami wytrzymałościowymi oraz wysoką jakością [1]. Technologia wtryskiwania wspomaganego gazem jest stosowana już ponad dwadzieścia lat, obecnie znane są jej różnorodne odmiany [1], ze względu na swoje zalety stosowane coraz częściej. W wyniku dodania pewnych urządzeń,

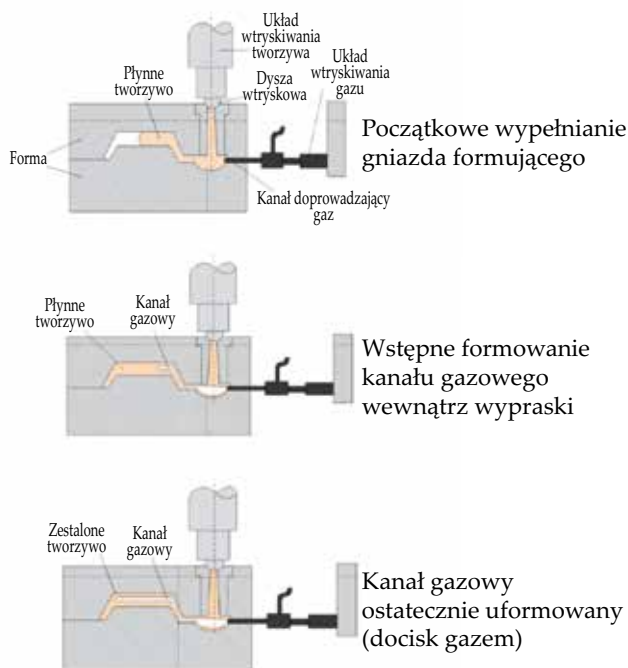
<sup>1)</sup> Politechnika Częstochowska, Katedra Technologii i Automatyzacji, al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, e-mail: nabialek@ipp.pcz.pl

nieznacznej modyfikacji konwencjonalnych form wtryskowych i niewielkiej ingerencji w układ sterowania wtryskarki można uzyskać zmniejszenie kosztów produkcji i zwiększenie wydajności, ale przede wszystkim otrzymać wypraski bez zapadnięć. Pojęciem formowanie wtryskowe wspomagane gazem (ang. *Gas Assisted Injection Molding* – GAIM) w bardzo szerokim znaczeniu można objąć również inne technologie, np. starszą metodę wtryskiwania porującego tworzywa termoplastycznych.

Wdrożenie procesu wtryskiwania wspomagane gazem nie wymaga zazwyczaj istotnych inwestycji. W większości wypadków można wykorzystać klasyczne wtryskarki, a mimo to ustawienie procesu oraz konstrukcja formy do wtrysku z gazem może sprawić przetwórcy sporo kłopotów.

Dostępne są specjalistyczne programy komputerowe przeznaczone do symulacji różnych metod wtryskiwania, w tym także procesu wtryskiwania z gazem (np. Autodesk Moldflow Insight, Moldex 3D, Cadmould). Wyniki takich symulacji dają pełny obraz przebiegu procesu przetwórstwa i pozwalają uniknąć błędów w ustawieniach rzeczywistego procesu oraz w konstrukcji narzędzi (form).

Od kilku lat programy komputerowe umożliwiają prowadzenie obliczeń dla modeli przestrzennych, niezbędnych w modelowaniu procesów takich jak wtryskiwanie wspomagane gazem. Modele powierzchniowe, używane wcześniej, nie pozwalały na przeprowadzenie symulacji dystrybucji gazu we wnętrzu wypraski.



Rys. 1. Schemat przebiegu procesu wtryskiwania wspomagane gazem przy częściowym wypełnieniu gniazda formującego [1]

Fig. 1. Diagram of the gas-assisted injection molding process with partial filling of the cavity (short shot method) [1]

Obecnie stosuje się zazwyczaj dwie metody wtryskiwania wspomagane gazem [1]: w warunkach częściowego wstępnego wypełnienia gniazda formującego oraz w warunkach całkowitego wypełnienia gniazda formującego (z gniazdami bocznymi).

Na rys. 1 i 2 schematycznie przedstawiono procedurę prowadzenia procesu wtryskiwania z gazem w wypadku wymienionych dwóch metod [1, 2].

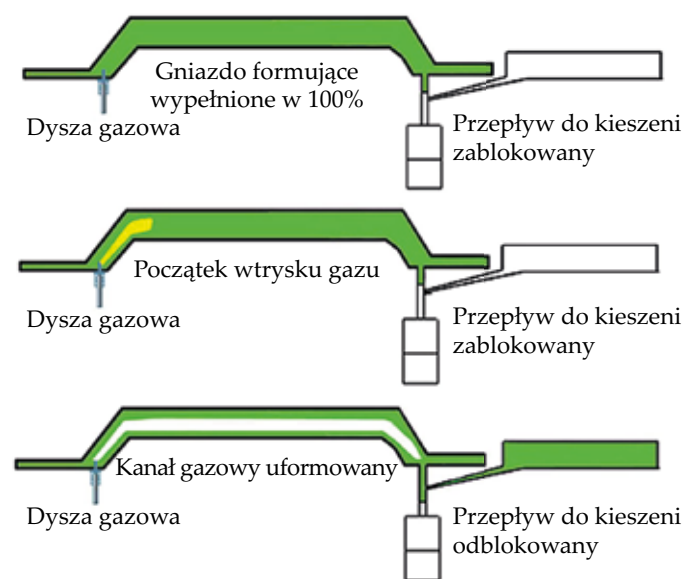
W literaturze opisano modelowanie procesu wtryskiwania wspomagane gazem wykorzystujące różne modele reologiczne oraz specyficzne algorytmy. Publikacje z tego zakresu obejmują analizy i równania matematyczne opisujące przepływ tworzywa w procesie wtryskiwania wspomagane gazem [3–6] lub przykłady weryfikacji doświadczalnej procesu [7–10].

W artykule przedstawiono wybrane wyniki symulacji procesu wtryskiwania wspomagane gazem w warunkach całkowitego wypełnienia gniazda formującego (z gniazdami bocznymi). Celem badań było określenie poprawności odwzorowania (przewidywania) za pomocą programu do symulacji rzeczywistego przebiegu procesu GAIM.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

Wtryskiwane tworzywo to polipropylen firmy Basell Polyolefins Europe o nazwie handlowej MOPLen EP301K ( $MFR = 4 \text{ g}/10 \text{ min}$ ).

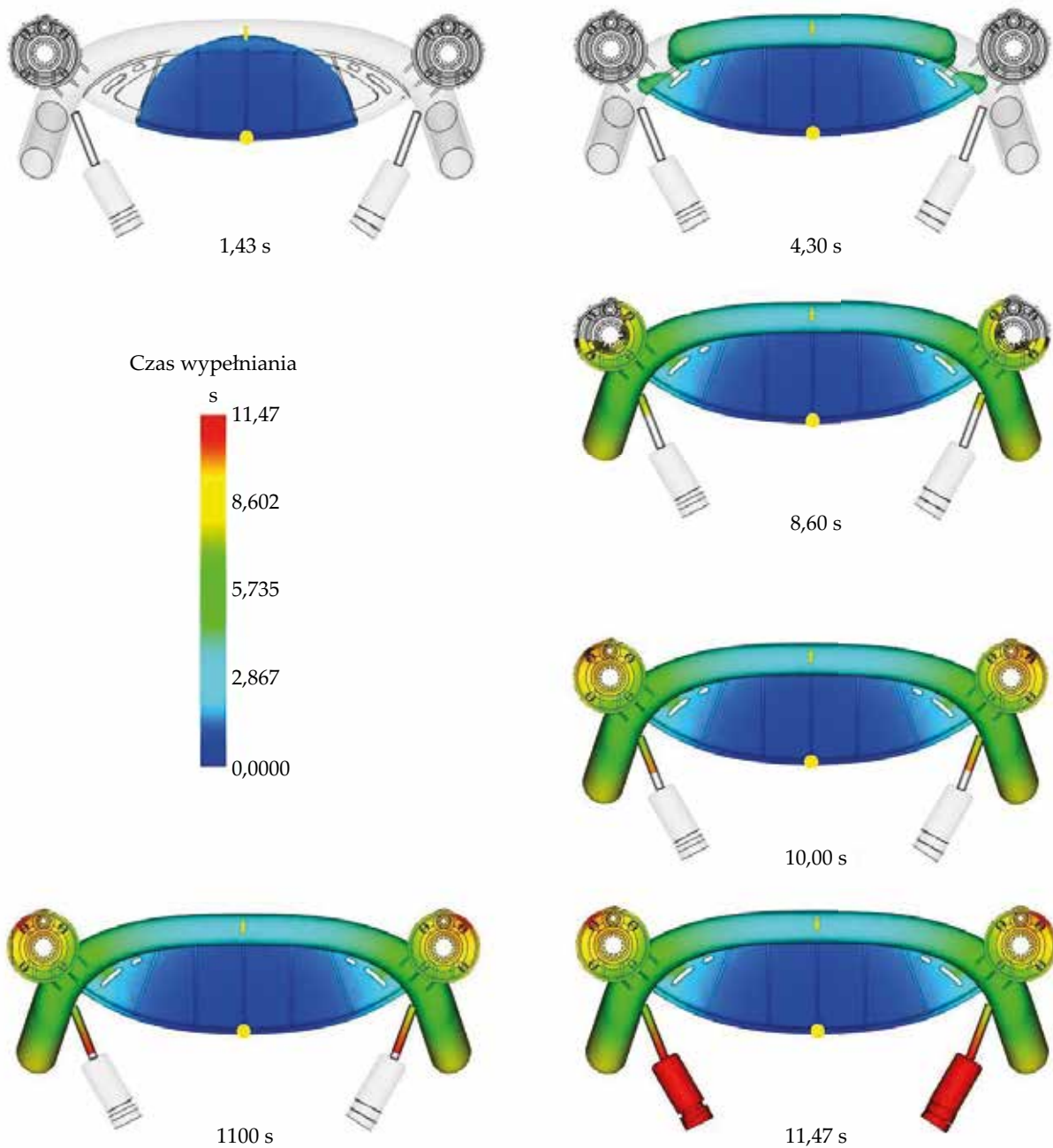


Rys. 2. Schemat przebiegu procesu wtryskiwania wspomagane gazem przy całkowitym wypełnieniu gniazda formującego [2]

Fig. 2. Diagram of the gas-assisted injection molding process with partial filling of the cavity (full filling method) [2]



Rys. 3. Fotografia rzeczywistej wypraski oraz model MES przygotowany do symulacji  
 Fig. 3. Photography of a real part and FEM model prepared for simulation



Rys. 4. Symulacja wypełniania gniazda formującego i gniazd bocznych  
 Fig. 4. Simulation of filling the cavity and overflow cells



## Metodyka badań

Symulację procesu wtryskiwania wspomaganego gazem wykonano w programie Autodesk Moldflow Insight w wersji 2017.

Przeprowadzenie symulacji wymagało wykonania modelu przestrzennego wypraski, a następnie rozpięcia na nim siatki elementów skończonych (MES). Wykorzystano do tego celu elementy tetrahedralne (czworościenne). Rysunek 3 przedstawia wypraskę oraz jej model MES przygotowany do symulacji. W swojej środkowej części wypraska ma fragment grubościenny, który trudno byłoby uzyskać klasyczną metodą wtryskiwania, m.in. ze względu na brak możliwości kontrolowania efektów wywołanych przez skurcz przetwórczy. Właśnie w tym fragmencie wypraski powinien być uformowany kanał gazowy.

Do modelu MES dodano dwa gniazda boczne na wypchnięte przez gaz tworzywo oraz dwa zawory, w zwykłych warunkach zamknięte, służące do sterowania przepływem tworzywa do wspomnianych gniazd (elementy belkowe).

Proces wtryskiwania wspomaganego gazem przeprowadzono z zastosowaniem wtryskarki hydraulicznej firmy Wittmann Battenfeld w następujących warunkach:

- temperatura wtryskiwania 240°C,
- temperatura formy 40°C,
- objętościowe natężenie przepływu 60 cm<sup>3</sup>/s,
- zwłoka uruchomienia wtrysku gazu 1,16 s,
- ciśnienie wtrysku gazu 35 MPa,
- czas wtrysku gazu 30 s,
- czas chłodzenia 20 s.

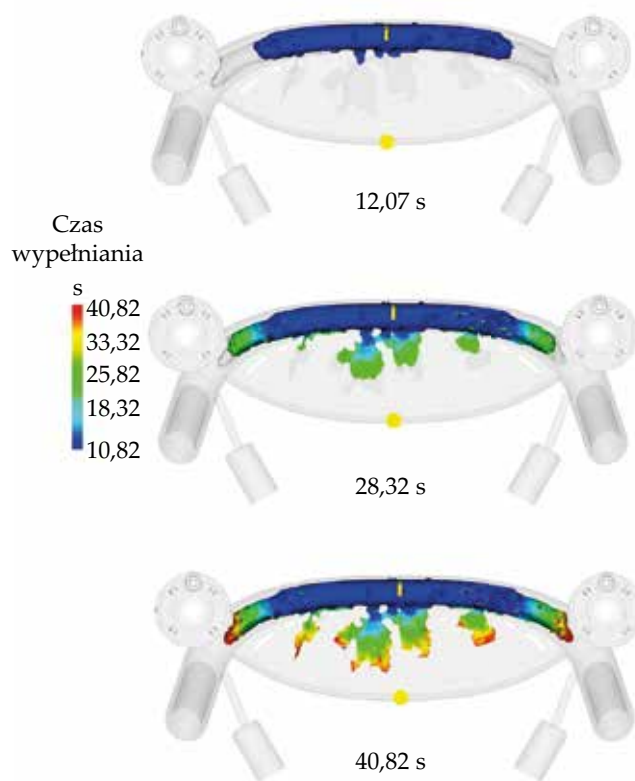
Zastosowanym gazem był azot.

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Rysunek 4 przedstawia wyniki symulacji wypełniania gniazda formy. Należy zwrócić uwagę na fakt, że gniazda boczne są zablokowane, co uniemożliwia przepływ tworzywa do gniazd bocznych w warunkach pustego gniazda formującego. Otwarcie zaworów, a w konsekwencji przepływ tworzywa, następuje dopiero po całkowitym wypełnieniu gniazda formującego oraz rozpoczęciu etapu wtrysku gazu (dwie ostatnie ilustracje na rys. 4).

Rysunek 5 prezentuje modelowanie procesu formowania kanału gazowego w wyprawce. Kształt i wymiary kanału zależą od wielu czynników, najważniejsze z nich to: objętość kieszeni bocznych, temperatura wtryskiwania, temperatura formy, profil ciśnienia gazu oraz czas trwania przerwy między zakończeniem fazy wtrysku tworzywa i rozpoczęciem fazy wtrysku gazu.

W trakcie formowania się kanału tworzywo wypierane przez gaz o dużym ciśnieniu gromadzi się w otwartych gniazdach bocznych. Symulacja tej metody wtryskiwania ma zazwyczaj na celu optymalizację warunków prowadzenia procesu oraz prawidłowy dobór objętości gniazd bocznych. Objętość tych gniazd decyduje o gra-



Rys. 5. Symulacja formowania kanału gazowego

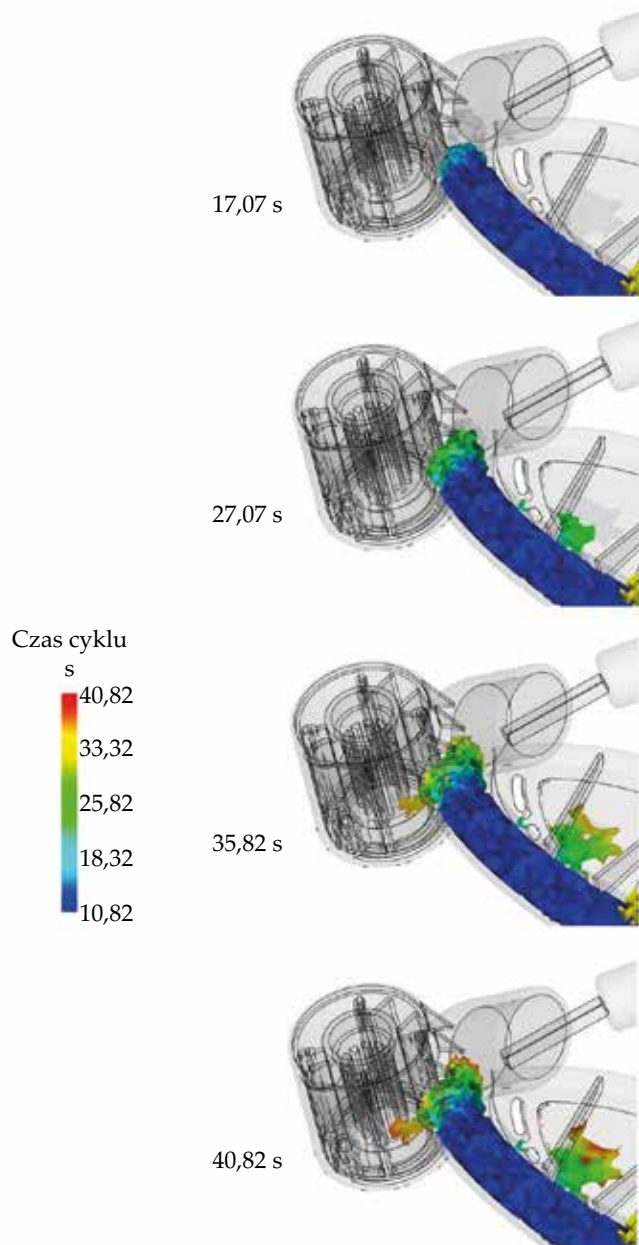
Fig. 5. Simulation of gas channel formation

maturze wypraski oraz wielkości i kształcie kanału gazowego, źle dobrana wielkość kieszeni (zbyt duża lub zbyt mała) może doprowadzić, z jednej strony, do przebicia frontu strumienia tworzywa i uwolnienia gazu, z drugiej strony do zbyt małej penetracji gazu, nadmiernej masy wypraski oraz małej skuteczności docisku gazem.



Rys. 6. Wnętrze kanału gazowego wypraski. Penetracja gazu poza kanał gazowy

Fig. 6. The interior of gas channel in the molded part. Gas penetration outside the gas channel

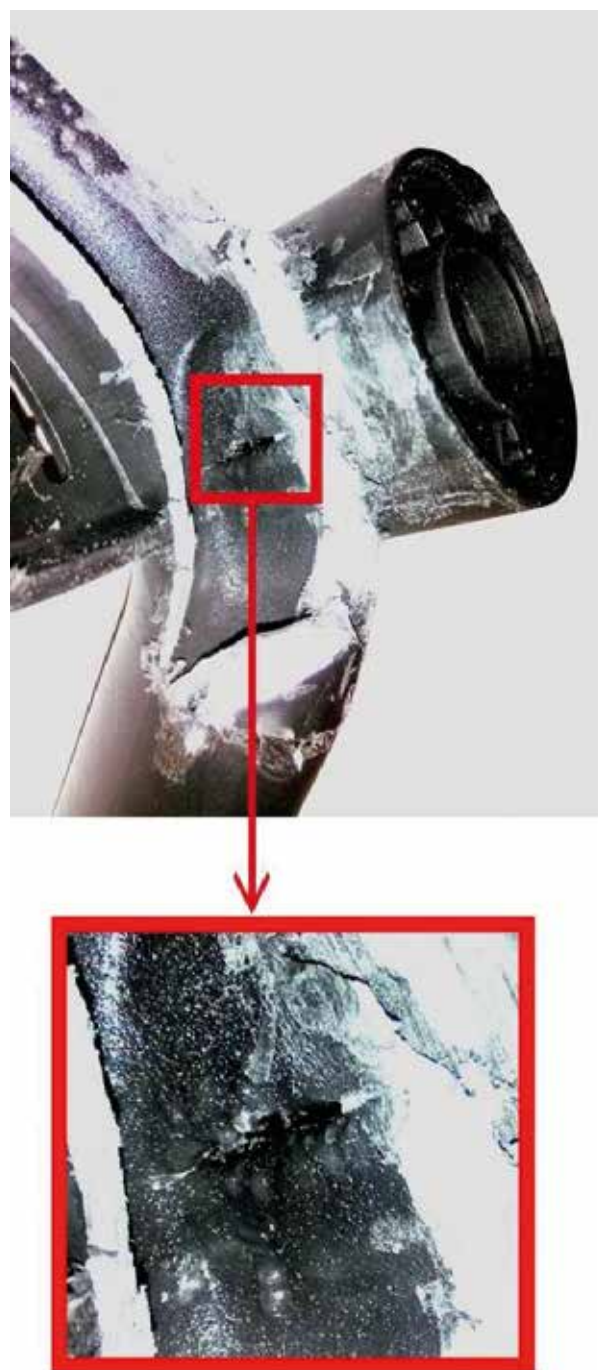


Rys. 7. Symulacja penetracji gazu w bocznych częściach wypraski

Fig. 7. Simulation of gas penetration in the side parts of the molded part

Na rysunku 6 przedstawiono kształt i objętość kanału gazowego w rzeczywistej wyprawce. Szczególną uwagę zwrócono na penetrację gazu poza kanał gazowy, w regionie ożebrowania wypraski. Stwierdzono duży stopień zgodności wyników symulacji z efektami rzeczywistego procesu przetwórstwa.

Penetracja gazu poza główny kanał nie ograniczyła się tylko do regionu ożebrowania wypraski. Gaz wypełnił również boczne regiony wypraski. Na rys. 7 przedstawiono wyniki symulacji penetracji gazu w bocznych regionach wypraski, a na rys. 8 wygląd rzeczywistego obszaru wypraski, gdzie nastąpiła penetracja gazu.



Rys. 8. Wnętrze kanału gazowego wypraski. Penetracja gazu w bocznych częściach wypraski

Fig. 8. The interior of gas channel in the molded part. Gas penetration in the side parts of the molded part

Porównano masę rzeczywistej wypraski z masą wypraski wygenerowanej przez program symulacyjny. Masa wypraski rzeczywistej wynosiła 365,2 g, a masa tworzywa zgromadzonego w gniazdach bocznych – 51,2 g. Na podstawie wyników symulacji stwierdzono, że masa wypraski powinna mieć wartość 358,3 g, a masa tworzywa zgromadzonego w gniazdach bocznych – 60,2 g. Sumaryczna masa wtryskiwanego tworzywa w procesie rzeczywistym to 416,4 g, natomiast w procesie symulowanym – 418,5 g. Mimo dużej rozbieżności

między rzeczywistą masą tworzywa zgromadzonego w gniazdach bocznych a przewidywaniami symulacyjnymi, stopień dokładności odwzorowania rzeczywistego procesu przetwórstwa jest zadowalający (ok. 2% błędu). Przyczyn rozbieżności wartości masy wypraski rzeczywistej i symulowanej można dopatrywać się w niedoskonałości odwzorowania kształtu geometrycznego wypraski rzeczywistej przez model MES (siatkę elementów skończonych).

Wyniki symulacji w znacznym stopniu potwierdza analiza rzeczywistej wypraski. Przebieg procesu wtryskiwania wspomaganego gazem można więc przewidywać na podstawie obliczeń numerycznych. Pozwala to na zapobieganie problemom przetwórczym już na etapie projektowania wypraski oraz konstruowania formy wtryskowej.

### PODSUMOWANIE

Wtryskiwanie tworzyw polimerowych wspomaganie gazem jest nowoczesną technologią otrzymywania wyprasek zyskującą spore uznanie. W Polsce coraz więcej zakładów decyduje się na wdrożenie tej technologii. Różnorodność odmian wtryskiwania wspomaganego gazem gwarantuje możliwość zastosowania najbardziej optymalnej metody do wyprodukowania zamierzonej wypraski. Przydatność różnych wariantów metody GAIM należy rozpatrywać indywidualnie dla każdego przypadku, ale zalety jej stosowania, takie jak: obniżenie kosztów wytwarzania, poprawa jakości warstwy wierzchniej wytworów oraz większa swoboda w projektowaniu wyprasek, powinny przekonać przetwórców do stosunkowo niewielkich inwestycji związanych z wdrożeniem tej technologii.

Wykazano, że symulacje komputerowe procesu wtryskiwania wspomaganego gazem pozwalają zadowalająco dokładnie przewidywać dystrybucję tworzywa i gazu w gnieździe formującym oraz gniazdach bocznych, a także szacować masę wynikowej wypraski.

Symulacje komputerowe opisywanego procesu są niezastąpionym narzędziem w fazie projektowania oraz przewidywania efektów planowanego procesu przetwórstwa. Pozwalają uniknąć wielu błędów konstrukcyjnych

i technologicznych oraz przyspieszają wdrożenie nowych wytworów do produkcji. Coraz większa liczba instalacji oprogramowania symulacyjnego świadczy o rosnącym zaufaniu przemysłu do wyników analiz numerycznych dotyczących procesów przetwórstwa tworzyw polimerowych.

### LITERATURA

- [1] Stachowiak T.: „Analiza wpływu warunków przetwórstwa na wybrane właściwości wyprasek wytwarzanych metodą wtryskiwania wspomaganego gazem”, rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska 2010.
- [2] <https://www.dekalbplastics.com/wp-content/uploads/2015/04/gas-assist-injection-molding-process.jpg>
- [3] Nian S.C., Li M.H., Huang M.S.: *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2015**, 86, 358.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.027>
- [4] Li Q., Ouyang J., Yang B., Li X.: *Applied Mathematical Modelling* **2012**, 36, 2262.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.08.023>
- [5] Han S.Y., Kwag J.K., Kim C.J. et al.: *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, 155–156, 1201.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.338>
- [6] Qiang L., Jie O., Binxin Y., Tao J.: *Applied Mathematical Modelling* **2011**, 35, 257.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2010.06.002>
- [7] Dimakopoulos Y.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **2010**, 165, 409.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2010.01.017>
- [8] Olley P.: *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* **2020**, 278, 104246.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2020.104246>
- [9] Xin L.L., Sharif S., Saad R.M.: *Procedia Manufacturing* **2015**, 2, 538.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.093>
- [10] Chen L., Li J., Zhou H. et al.: *Journal of Materials Processing Technology* **2008**, 208, 90.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.118>

Received 10 III 2020.