

Karol PEPLIŃSKI

e-mail: karolpep@utp.edu.pl

Zakład Inżynierii Materiałowej i Przetwórstwa Tworzyw, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Ocena wybranych cech wypraski otrzymanej w warunkach rzeczywistych i podczas symulacji wtryskiwania

### Wstęp

**Wtryskiwanie** jest jedną z głównych technik przetwórstwa tworzyw polimerowych stosowanych w produkcji zróżnicowanych wytworów [Osswald, 2007; Rosato, 2012]. Przykładowo w 2016 roku w Europie około 5 mln ton tworzyw zostało zużyte na produkcję wyprasek dla motoryzacji [PlasticEurope, 2018]. Całościowe kształtowanie właściwości użytkowych wyrobów z tworzyw sztucznych odbywa się na etapie projektowania wyprasek, potem kolejno form wtryskowych, włącznie z przygotowaniem i ich wykonaniem w procesie produkcyjnym, a także w fazie użytkowania wyprasek [Zawistowski, 2008, 2010; Kazamer, 2016].

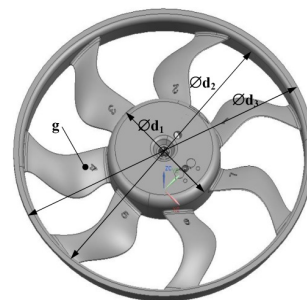
**Badania i analiza parametrów wtryskiwania** z zastosowaniem różnych materiałów polimerowych oraz zróżnicowanych modeli matematycznych w algorytmach obliczeniowych są przedmiotem wielu prac, m.in. [Nabialek 2013; Gurjeet, 2017]. Współcześnie zastosowanie komputerowego wspomaganie wytwarzania w przetwórstwie tworzyw w tym symulacji procesu wtryskiwania jest niezbędnym elementem umożliwiającym otrzymanie wyrobów w warunkach rzeczywistych o określonych cechach, w tym geometrycznych i jakościowych. Zastosowanie tego typu oprogramowań znacząco skraca czas niezbędny na wskazanie właściwego rozwiązania na etapie projektowania i wytwarzania wytworów oraz narzędzi – form wtryskowych. Bardzo często dokładność wyników symulacji jest uzależniona od samych algorytmów matematycznych występujących w oprogramowaniu oraz przyjęcia założeń możliwych do zastosowania w warunkach rzeczywistych. Rezultaty symulacji komputerowych często są kolejno weryfikowane z wytworzonymi wytworami rzeczywistymi. Szerzej proces wtryskiwania oraz kwestie związane z symulacjami wtryskiwania jest przedstawiono np. w pracach [Wilczyński, 1999; Osswald, 2007; Sykutera, 2008; 2010; Narowski, 2015].

**Oprogramowanie do symulacji wtryskiwania** jest obecnie dostępne na rynku w postaci oprogramowań szczegółowych dedykowanych, jak: Autodesk Moldflow, Cadmould, Moldex 3D oraz Sigmasoft [Autodesk [2018]. Podstawową zaletą tych oprogramowań jest między innymi możliwość przeprowadzenia analizy wypełnienia w gnieździe formującym w funkcji czasu oraz kwestii związanych ze skurczem przetwórczym. Pozwala to na określenie, gdzie tworzywo dopłynie najszybciej oraz czy gniazda formy zostaną wypełnione równomiernie, a także czy zostaną zachowane wymiary konstrukcyjne wynikające m.in. z fenomenu skurczu przetwórczego [Zawistowski, 2008]. Szerzej informacje o warunkach wypełnienia gniazda formy przedstawiono w pracy Zawistowskiego i Zięby [2013]. Uzyskiwanie za pośrednictwem oprogramowań CAE optymalnej postaci wytworu wedle rozpatrywanych kryteriów niezbędnych do osiągnięcia przez wypraski rzeczywiste prowadzi do uzyskania wytworów o podwyższonej jakości [Osswald, 2007].

W pracy przeprowadzono porównanie wybranych wyników symulacji numerycznej procesu wtryskiwania z parametrami wytworów otrzymanych w warunkach rzeczywistej produkcji.

### Metodyka badań

**Wypraska.** Do badań numerycznych jak i w warunkach rzeczywistych przyjęto wypraskę techniczną, której model przedstawiono na rys. 1, a dane charakterystyczne tworzywa poliamidu 6.6 wzmocnionego w 30% włóknem szklanym (Technyl A218 V30 Natural), z którego jest wykonana wypraska podane są na stronie producenta [Solvay, 2017]. Wypraska jest docelowo przeznaczona dla jednego z czołowych producentów motoryzacyjnych.



Rys. 1. Rozpatrywany model wypraski (wiryk wentylatora) z materiału PA6.6 + 30%GF. Charakterystyczne wymiary [mm]:  $\varnothing d_1 = 114$ ,  $\varnothing d_2 = 379$  i  $\varnothing d_3 = 400$  oraz  $g = 2,2$

**Proces wtryskiwania.** W celu sprawdzenia, czy wyniki symulacji odpowiadają rezultatom otrzymanym w rzeczywistości pod względem kierunku oraz stopnia wypełnienia oraz skurczu przetwórczego, wykonano serię próbek w procesie wtryskiwania. Podczas prób stopniowo wydłużano czas wtryskiwania zgodnie z przyjętym poniżej planem badań do momentu uzyskania pełnej wypraski. Następnie weryfikowano podobieństwo wypraski zarówno pod stopniem wypełnienia gniazda formy oraz skurczu przetwórczego rzeczywistego z wynikami symulacji przy zastosowaniu tych samych ograniczeń czasowych.

**Parametry technologiczne** zarówno w symulacji, jak i w warunkach rzeczywistych dla zapewnienia zbliżonego środowiska przebiegu procesu wtryskiwania zastosowano takie same, m.in.: temperatura wtryskiwania: 290°C, ciśnienie wtryskiwania: 89,8 MPa, czas wtrysku: 1,6 s, ciśnienie docisku: 55 MPa, czas docisku: 5 s, czas cyklu wytwarzania: 36,6 s, temperatura formy: 35°C, czas chłodzenia od wypełnienia formy: 35 s, masa wypraski: 338,5 g.

**Czynniki wejściowe** zostały określone dla warunków rzeczywistych eksperymentu i symulacji jako: % wypełnienia gniazda formy w przyjętych sześciu punktach czasowych ( $t_1 \div t_7 = 0,8; 1; 1,3; 1,4; 1,55; 1,6$  i  $1,65$  s) oraz jako rzeczywisty skurcz przetwórczy w określonych punktach pomiarowych tj. dla średnicy  $\varnothing d_1$ ,  $\varnothing d_2$  i  $\varnothing d_3$  oraz grubości  $g$  (Rys.1).

**Oprogramowanie.** Rozpatrywane warunki symulacji numerycznej realizowano za pośrednictwem oprogramowania Cadmould 3D-F v. 9.1.2.8. Numeryczny model wypraski uwzględniał fakt, że do jej produkcji wykorzystano formę dwugniazdową.

**Aparatura.** wypraski wytwarzano w warunkach rzeczywistych za pośrednictwem maszyny Krauss Maffei KM 800. Procentowy stopień wypełnienia gniazda formy oceniano pośrednio poprzez pomiar masy wypraski zaś skurcz przetwórczy za pomocą maszyny współrzędnościowej Mistral (Brown&Shape). Wymiary:  $\varnothing d_1$ ,  $\varnothing d_2$  i  $\varnothing d_3$  oraz wymiar  $g$  określano za pomocą grubościomierza Magna-Mike 8600 (Olympus). Skurcz wyznaczano po 24 godzinach od wytworzenia wypraski w temperaturze otoczenia 23°C.

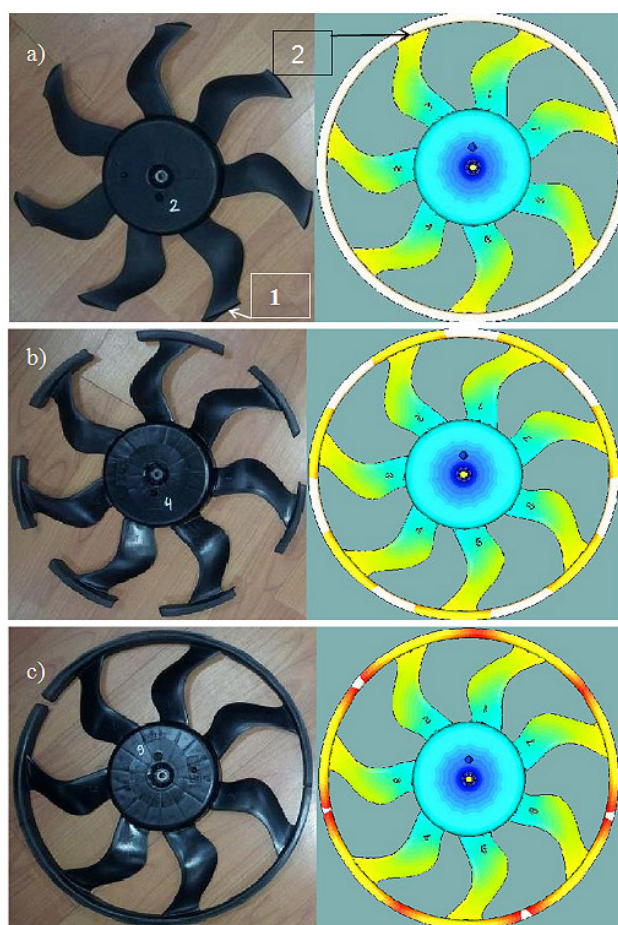
### Wyniki symulacji i dyskusja

Różnice między wynikami wypełnienia gniazda formy dla przyjętych określonych siedmiu punktów czasowych obliczonych na podstawie danych z eksperymentu wirtualnego i pomiaru rzeczywistego i są zbliżone, a niewielkie różnice nie przekraczają 1 do 2% (Tab.1). Przykładowe wypełnienie gniazda formy w rozpatrywanych przypadkach pokazano na rys. 2. Dla uzyskanych pierwszych pięciu punktów czasowych wypełnienia gniazda formy w warunkach rzeczywistych

Tab. 1. Stopień wypełnienia gniazda formy w określonych momentach czasowych

Moment cyklu wtryskiwania, [s]		Wypełnienie gniazda formy, [%]	
		Symulacja	Eksperyment
$t_1$	0,8	50	51
$t_2$	1,0	64	65
$t_3$	1,3	75	73
$t_4$	1,4	82	80
$t_5$	1,55	90	91
$t_6$	1,6	97	99
$t_7$	1,65	100	100

jak i symulacyjnych są zbliżone. Dopiero w ostatnim odstępie czasowym, tuż przed przełączeniem na ciśnienie docisku pojawiły się nieznaczne rozbieżności (Rys. 2b). W warunkach rzeczywistych widać, iż wypełnienie gniazda formy jest prawie całkowite (99%), zaś w warunkach symulacji komputerowej dostrzec można 4 miejsca (białe obszary), gdzie nie nastąpiło jeszcze wypełnienie gniazda formy.



Rys. 2. Przykładowe wyniki badań dotyczące wypełnienia gniazda formy dla punktów czasowych: a) 0,8s, b) 1,4s, c) 1,6s; (po lewej stronie wytwór rzeczywisty; po prawej symulacja w *Cadmould*; punkty 1, 2 – czoło płynięcia tworzywa)

Rozbieżności te mogą wynikać z faktu wystąpienia odmiennych podstaw występujących w warunkach rzeczywistych np. rozkład temperatury w gnieździe formy.

W odniesieniu do wartości skurczu przetwórczego wtórnego rozbieżności między warunkami eksperymentu rzeczywistego i wirtualnego w odniesieniu do trzech założonych średnic są różne (Tab. 2) i wynoszą dla średnicy  $\varnothing d_1 = 0,13\%$ ,  $\varnothing d_2 = 0,07\%$  i  $\varnothing d_3 = 0,18\%$ , zaś dla grubości  $g = 0,13\%$ . W każdym przypadku eksperymentu wirtualnego wartości skurczu przetwórczego są większe niż wartości skurczu rzeczywistego.

Tab. 2. Wartości skurczu przetwórczego wtórnego

Oceniany wymiar, [mm]	Wartość skurczu, [%]	
	Symulacja	Eksperyment
$\varnothing d_1$	0,47	0,34
$\varnothing d_2$	0,50	0,43
$\varnothing d_3$	0,57	0,39
g	0,49	0,36

## Wnioski

Oprogramowanie *Cadmould* daje możliwość realizacji testu numerycznego w zakresie modelowania zjawisk zachodzących podczas procesu formowania wtryskowego i umożliwia wskazanie działań zasadnych w warunkach rzeczywistych procesu produkcyjnego.

Z naukowego punktu widzenia zasadnym jest ewentualne wskazanie różnic w odniesieniu do wybranych cech wypraski (np. wypełnienie gniazda formy, skurcz przetwórczy) uzyskanych w warunkach symulacji numerycznej i rzeczywistego procesu. Często pojawiały się różnice wartości rozpatrywanych cech, jednakże ich wielkość była uzależniona od przyjętych założeń wstępnych oraz dostępnego modelu numerycznego.

Skorelowanie wyników symulacji z próbami rzeczywistymi może znacząco skrócić czas wdrażania produktu na rynek, obniżyć jednostkowe zapotrzebowanie energii na realizację procesu wtryskiwania oraz obniżyć negatywne oddziaływanie na środowisko.

## LITERATURA

- Cadmould, (2018) *Program do symulacji i analizy procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych* (08.2018): [www.wadim.com.pl/pl/o/CADMOULD](http://www.wadim.com.pl/pl/o/CADMOULD)
- Gurjeet S., Ajay V., (2017). *A brief review on injection moulding manufacturing process*. *Materials Today: Proceedings* 4(2017), 1423–1433
- Kazamer D. O., (2016). *Injection mold design engineering*. Carl Hanser Verlag
- Moldex 3D, (2018). *Moldex3D – the world leading CAE product for the plastic injection molding industry* (08.2018): <http://www.moldex3d.com/>
- Moldflow, (2018). *Moldflow – software for plastic injection molding simulation to improve plastic part designs, injection mold designs, and manufacturing processes*. (08.2018): [www.autodesk.com/products/moldflow](http://www.autodesk.com/products/moldflow)
- Nabiałek J., (2013). Weryfikacja doświadczalna modelowania wybranych zjawisk występujących w procesie wtryskiwania tworzyw termoplastycznych. *Przetw. Tworzyw.* (3)153, 235-238
- Narowski P., Wilczyński, K. (2015). Study on filling patterns of engineering polymers in geometrically balanced injection molds. *Challenges of Modern Technology*. 6(2), 15-18
- Osswald T., Turng L., Gramann P. (2007). *Injection molding handbook*, 2 Ed. Hanser Publisher, Munich
- PlasticEurope, (2018). *Plastics – the Facts 2017: An analysis of European plastics production, demand and waste data* (06.2018): [https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics\\_the\\_facts\\_2017\\_FINAL\\_for\\_website\\_one\\_page.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf)
- Rosato D. V., (2012). *Injection Molding Handbook*. Springer-Verlag, New York Inc.
- SigmaSoft (2018). *Virtual moulding* (06. 2018): [www.sigmasoft.de](http://www.sigmasoft.de)
- Solvay, (2017). *Advanced materials & specialty chemicals company* (08.2018): <https://www.solvay.com/en/product/technyl-psb-231-natural>
- Sykutera D., Bieliński, M. (2010). *The use of injection moulding process simulation software cadmould for injection mould designing*. *Journal of Polish CIMAC*. 5(3), 193-200
- Sykutera D., Krupiński W., Hejnowski M, Nowak M. (2008). *Symulacja procesu wtryskiwania poliamidu 6.6*. *Inż. Ap. Chem.*, (5), 44-46
- Wilczyński K., (1999). *The CADMOULD-3D computer system for modeling injection molding process-Simulation of the filling phase*. *Polimery* 44(10), 407-412.
- Zawistowski H., (2008a). Podstawy teorii kształtowania właściwości wyrobów w procesie wtryskiwania tworzyw termoplastycznych. *Mechanik*, 81(4), 274-280
- Zawistowski H., (2008b). Teoria i praktyka procesu wtryskiwania tworzyw w szkoleniu inżynierów różnych specjalności. *Mechanik*, 81(4), 306-310
- Zawistowski H., (2010). Założenia projektowe dokumentacji technicznej wyprasek z tworzyw sztucznych. *Mechanik*, 83(4), 250-255
- Zawistowski H., Zięba S. (2013). Warunki wypełniania formy przy wtryskiwaniu tworzyw termoplastycznych. *Mechanik*, 86(4), 302-308