

Symulacje komputerowe procesu wtryskiwania porującego^{*)}

Paweł Palutkiewicz¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.132

Streszczenie: Przeprowadzono symulacje procesu wtryskiwania mikroporującego MuCell, w których wykorzystano program komputerowy Moldflow Plastics Insight 5.0. Dokonano analizy wpływu rodzaju tworzywa i grubości ścianki wypraski na jej strukturę porowatą, naprężenie i odkształcenie oraz wartość skurczu objętościowego. Wyniki porównano z zależnościami odnoszącymi się do procesu wtryskiwania z wykorzystaniem chemicznego środka porującego. Stwierdzono, że wysokość gniazda formującego wywiera istotny wpływ na rozkład temperatury i ciśnienia wtryskiwanego tworzywa, a także na wymiary i rozkład porów w wypraskach. Zastosowanie opisywanej metody wtryskiwania mikroporującego pozwala na znaczne zredukowanie czasu i ciśnienia docisku, a tym samym skrócenie czasu całego cyklu wtryskiwania.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie porujące, wtryskiwanie mikroporujące, symulacje komputerowe.

Computer simulations of cellular injection moulding process

Abstract: Computer simulations of the MuCell — microcellular injection moulding process were carried out using Moldflow Plastics Insight 5.0 software. An analysis of the effect of plastic type and wall thickness of the moulded part on its porous structure, internal stress and strain as well as the value of volumetric shrinkage was performed. The results of these simulations were compared with the relationships for cellular injection moulding process using chemical blowing agent. It was found that the cavity height has a significant influence on the distribution of temperature and pressure of liquid plastic as well as size and distribution of pores in the moulded parts. Application of this injection moulding method can significantly reduce the holding time and pressure and, in effect, the time of the injection cycle.

Keywords: cellular injection moulding, microcellular injection moulding, computer simulations.

Tworzywa mikroporowate są przetwarzane głównie metodami wtryskiwania, wytłaczania i wytłaczania z rozdmuchiwaniami [1–3]. W procesie wtryskiwania mikroporującego otrzymuje się wypraski o jednorodnej mikroporowatej strukturze. Uzyskane pory mają bardzo małe wymiary (0,1–10 μm) [4–6], a ich ilość zmienia się w przedziale 10^7 – 10^{15} porów w 1 cm³ tworzywa [4, 7]. Liczne znane procesy wtryskiwania mikroporującego (MuCell, ErgoCell, Optifoam) polegają na wprowadzeniu gazu porującego w stanie nadkrytycznym do tworzywa ciekłego w układzie uplastyczniającym wtryskarki lub w specjalnej głowicy, umieszczonej między układem uplastyczniającym a formą wtryskową, i wytworzeniu jednofazowego roztworu, wtryskiwanego następnie do

formy [1, 8–17]. W wyniku gwałtownego zmniejszenia ciśnienia w formie następuje nukleacja dużej liczby zarodków, które powodują powstawanie mikroporów. Proces rozrastania się mikroporów jest sterowany głównie za pomocą ciśnienia i temperatury tworzywa. Do ostatecznego uformowania wypraski dochodzi w gnieździe formującym, przy czym rolę ciśnienia docisku odgrywa ciśnienie gazu wewnątrz powiększających się porów. Właściwości wyprasek mikroporowatych są niewiele gorsze niż właściwości wyprasek litych z takiego samego tworzywa, jednak proces wtryskiwania porującego musi być realizowany z zastosowaniem wtryskarek wyposażonych w specjalne (a więc kosztowne) oprzyrządowanie do dozowania i wtrysku gazu porującego.

Sterowanie procesem wtryskiwania mikroporującego jest zagadnieniem złożonym, zależnym od wielu zjawisk występujących w trakcie mieszania gazu w stanie nadkrytycznym z uplastycznionym tworzywem. Prawidłowy dobór warunków procesu, a w rezultacie uzyskanie wyprasek z równomiernie rozłożoną strukturą porowatą zależy między innymi od rodzaju tworzywa, metody mikroporowania, budowy układu uplastyczniającego, rodzaju tworzywa, gazu porującego i stosowanych

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Zakład Przetwórstwa Polimerów, Al. Armii Krajowej 19c, 42-201 Częstochowa, e-mail: palutkiewicz@ipp.pcz.pl

^{*)} Materiał zawarty w artykule stanowił treść wystąpienia w ramach XIII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Polimery i Kompozyty Konstrukcyjne”, która odbyła się w dniach 17–20 września 2013 r. w Wiśle.

napełniaczy. Zagadnienia te omówiono w pracach [3, 18, 19].

Celem wtryskiwania mikrooporującego jest wytwarzanie wyprasek o bardzo małej masie, ale o właściwościach mechanicznych zbliżonych do właściwości wyprasek litych. Wspomniana metoda umożliwia otrzymanie cienkościennych wyprasek mikrooporowatych, nawet o grubości ścianki 0,3 mm [1]. Korzystne też jest skrócenie czasu cyklu wtryskiwania. Dużą zaletą tej metody jest to, że eliminuje takie wady wyprasek, jak niedokładności ich wymiarów spowodowane skurczem przetwórczym (pierwotnym i wtórnym), zapadnięcia oraz niekorzystne zmiany barwy lub połysku. Występowanie wad wynikających ze skurczu tworzywa należy uwzględnić już na etapie projektowania form wtryskowych. Uzasadnione więc jest stosowanie programów wykorzystujących metodę elementów skończonych (np. Moldflow, Moldex3D) do analizy procesu wypełniania gniazda i zestalania się w nim tworzywa.

Rozrost porów jest zjawiskiem złożonym, na które wpływ wywiera wiele czynników fizycznych i chemicznych. Powstawanie struktury porowatej przedstawia się za pomocą licznych modeli matematycznych, szeroko opisanych w literaturze [20–26]. Modelowanie struktur porowatych może uwzględniać rozmaite czynniki, istotne w ujęciach: inżynierskim, termodynamicznym, mechanochemicznym i in. W pracy M. Bielińskiego [20] przedstawiono między innymi modele: uniwersalny komórkowego rozrostu porów, bilansowania cieplnego, dyfuzyjny, przenikania i kompresyjno-syntetyczny.

Obecnie symulację procesu wtryskiwania mikrooporującego umożliwiają dwa programy — Moldflow oraz, od niedawna, Moldex3D [27], wykorzystujące modele rozpuszczalności gazu, dyfuzji gazu i lepkości [28].

W przypadku wtryskiwania mikrooporującego rozróżnia się dwie metody wtrysku [29]:

— Krótki wtrysk (ang. *short-shot*) — tworzywem jest wypełniana tylko część gniazda formującego, na skutek rozrostu porów w ciekłym tworzywie następuje wypełnienie całej formy.

— Pełen wtrysk (ang. *full-shot*) — tworzywem jest wypełnione całe gniazdo formujące, rozrost porów eliminuje zapadnięcia i skurcz wypraski.

W przeprowadzanych badaniach wykorzystano metodę *full-shot*. Tworzywo doprowadzono długimi kanałami o znacznej objętości. W czasie pokonywania długiej drogi przepływu w kanałach doprowadzających, tworzywo ciekłe ochładzano, malało jego ciśnienie i efektywność rozrostu porów. Stosowanie metody *full-shot* umożliwia bardziej efektywne porowanie w gniazdach porujących z tego typu układem doprowadzającym.

Za pomocą program Moldflow można wykonać analizę procesu wtryskiwania mikrooporującego obejmującą: wypełnianie gniazda, zestalanie gniazda (również tworzywami zawierającymi napełniacz) i docisk, chłodzenie, odkształcenia wyprasek. W niniejszej pracy

przedstawiono wyniki analizy w odniesieniu do tworzyw litych i tworzyw z dodatkiem poroforu.

W symulacjach stosowano dostępne w programie modele reologiczne Cross-WLF i domenowy termodynamiczny model Taita oraz modele dodatkowe, wykorzystywane w symulacjach numerycznych procesu wtryskiwania mikrooporującego: model lepkości polimer-gaz, model dyfuzji gazu oraz model rozpuszczalności gazu [28].

Model lepkości odnoszący się do wtryskiwania mikrooporującego jest opisywany następującym równaniem [28]:

$$\eta = \eta_r(1 - \phi)^{\nu_1} \exp(\nu_2 c + \nu_3 c^2) \quad (1)$$

gdzie: η — lepkość mieszaniny polimer-gaz, η_r — lepkość tworzywa (bez gazu), ϕ — udział objętościowy pęcherzy gazu, c — stężenie początkowe gazu, ν_1, ν_2, ν_3 — współczynniki stałe.

Model dyfuzji gazu (gaz rozpuszczony w tworzywie na pierwszym etapie procesu wtryskiwania mikrooporującego w fazie porowania dyfunduje w głąb tworzywa, nukleuje powstawanie pęcherzyków gazu i inicjuje ich wzrost) wykorzystuje następujące równanie [28]:

$$D = d_1 e^{\left(\frac{d_2}{T}\right)} \quad (2)$$

gdzie: D — współczynnik dyfuzji, T — temperatura, d_1, d_2 — współczynniki stałe.

Jeżeli wartość $d_2 = 0$, współczynnik dyfuzji będzie stały i równy d_1 .

Model rozpuszczalności gazu opisuje następujące równanie [28]:

$$k = k_1 e^{\left(\frac{k_2}{T}\right)} \quad (3)$$

gdzie: k — współczynnik rozpuszczalności, T — temperatura, k_1, k_2 — współczynniki stałe.

Jeśli wartość $k_2 = 0$, współczynnik rozpuszczalności będzie stały i równy k_1 .

Wartość rozpuszczalności gazu w ciekłym polimerze może wpływać zarówno na lepkość tworzywa, jak i rozmiar porów w wyprase.

Symulacja wtryskiwania mikrooporującego wykorzystująca program Moldflow przebiega w sposób uproszczony w porównaniu z przebiegiem rzeczywistym procesu mikrooporowania. W procesie rzeczywistym nukleacja porów następuje już w fazie wypełniania gniazda tworzywem z rozpuszczonym gazem. W symulacjach numerycznych rozrost porów rozpoczyna się po fazie wtrysku i wypełnieniu gniazda tworzywem, ponadto moment zapoczątkowania nukleacji porów jest definiowany przez użytkownika.

W literaturze brakuje prac dotyczących porównania i weryfikacji wyników symulacji numerycznych z modelami rzeczywistymi. W pracy [30] porównano wypraski o kształcie miski olejowej, uzyskiwane w procesie wtryskiwania gorącokanałowego konwencjonalnego i mikrooporującego. Zastosowanie metody MuCell umożliwiło

zmniejszenie masy wyprasek o 10 %, a jednocześnie skrócenie czasu docisku i objętości wtryskiwanego tworzywa. Wykazano bardzo dużą zbieżność wyników symulacji komputerowych z wynikami uzyskanymi w procesie rzeczywistym, zwłaszcza w przypadku określania masy wyprasek. Wpływ wybranych parametrów wtryskiwania na wymiar porów badano w [18]. Przedstawiono wyniki symulacji numerycznych wtryskiwania mikrooporującego, prowadzonych według planów badań opartych na metodach Taguchi i Anova, wykorzystujących cztery zmienne niezależne: temperaturę wtryskiwania, objętość wtrysku, czas wtrysku i temperaturę formy. Wykazano znaczny wpływ temperatury wtryskiwania na wielkość mikroporów w wypraskach. W miarę wzrostu temperatury wtryskiwania średnica mikroporów się zwiększa, gdyż w warunkach wysokiej temperatury przetwarzania rośnie rozszerzalność gazu w porach. Zwiększanie objętości wtrysku powoduje zmniejszenie średnicy porów, gdyż większa ilość tworzywa w gnieździe ogranicza rozrost struktury porowatej. Wymiary porów są większe wówczas, gdy wydłuża się czas wtrysku oraz zwiększa się temperaturę formy. Wyższa temperatura formy wydłuża czas ochładzania wypraski, co sprzyja rozrostowi porów w niezestaloną jeszcze tworzywem o wysokiej temperaturze.

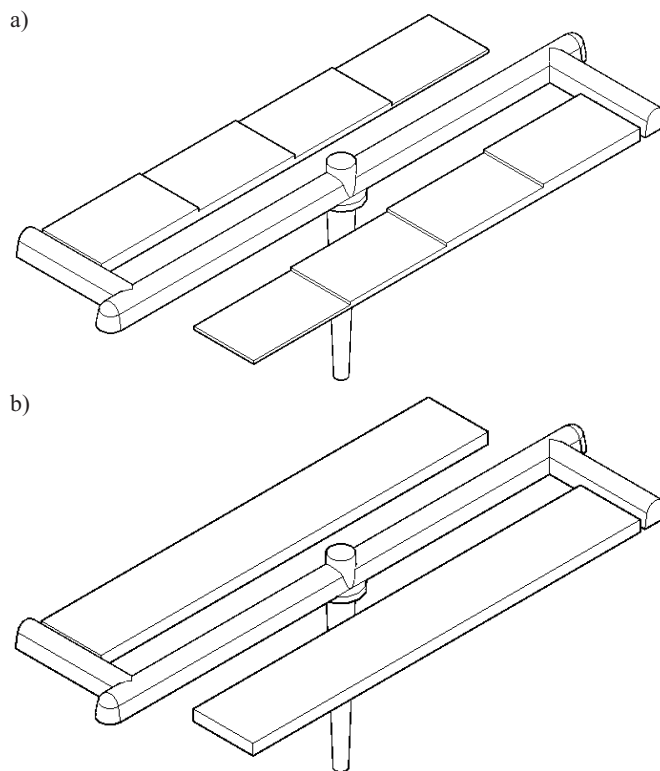
Szczegółową weryfikację struktury różnych mikrooporowatych wyprasek przemysłowych z wynikami symulacji w programie Moldflow, obrazującymi wielkość i rozkład porów przedstawiono w [31]. Stwierdzono, że zastosowanie modelowania numerycznego nie pozwala na kompleksową analizę tego typu zjawisk. Wykazano występowanie różnic wielkości porów w wypraskach i modelach, ponadto w wypraskach rzeczywistych gęstość porów była niejednorodna, w przeciwieństwie do gęstości będącej wynikiem symulacji. Zaproponowano zmiany w programie obejmujące opracowanie bardziej rozbudowanych danych materiałowych, dokładniejszego sterowania procesem, umożliwienie porowania w trakcie fazy wtrysku (co jest szczególnie istotne w przypadku metody short shot), uwzględnienie konwekcji porów oraz ich niejednorodnej nukleacji.

W pracy [32] badano wypraski mikrooporowate z izotaktycznego polipropylenu lub kompozytów IPP z nanonapełniaczem w postaci węgla wapnia. Poroforem był ditlenek węgla. Oceniano wpływ zawartości napełniacza i warunków wtryskiwania na morfologię i właściwości mechaniczne wyprasek. Wykazano, że drobne, gęsto rozłożone pory uzyskuje się w przypadku zastosowania niskiej temperatury formy i małej szybkości wtrysku. Obecność w tworzywie nanonapełniacza przyczynia się do zarodkowania porów o małej średnicy, których liczba zwiększa się wraz ze stopniem napełnienia tworzywa. Wpływa to na poprawę udarności i odporności na pękanie wyprasek. Symulacje numeryczne w odniesieniu do wyprasek z iPP nienapełnionego wykonano za pomocą programu Moldex 3D. Stwierdzono zgodność wyników symulacji z obserwacjami rzeczywistymi. Zaproponowa-

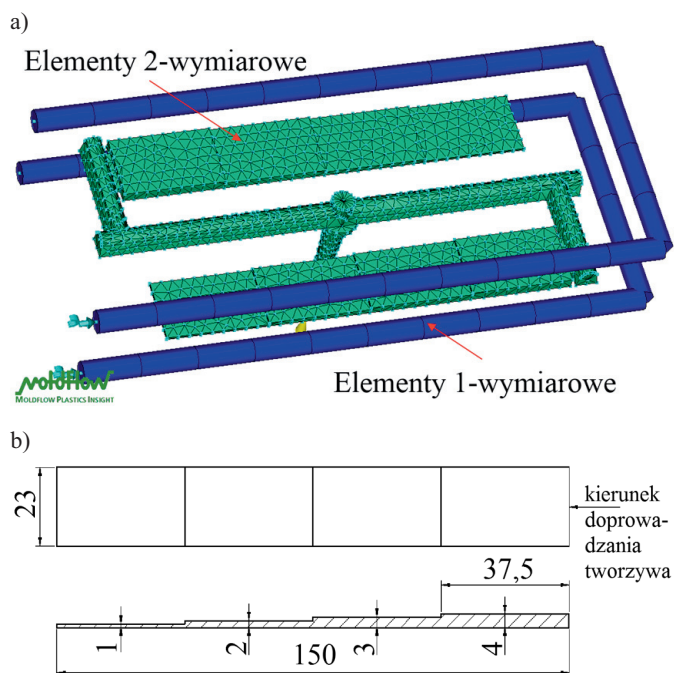
no dodanie do programu współczynników korygujących, umożliwiających przeprowadzenie symulacji procesu wtryskiwania tworzyw napełnionych.

ZAŁOŻENIA WSTĘPNE

Symulacje komputerowe wtryskiwania porującego przeprowadzono przy użyciu komercyjnego oprogramowania Moldflow Plastics Insight 5.0. Program jest wyposażony w moduł *Microcellular Injection Moulding*, pozwalający na przeprowadzenie symulacji wtryskiwania tworzywa z poroforem fizycznym (wtryskiwanie mikrooporujące MuCell), nie umożliwia jednak przeprowadzenia symulacji wtryskiwania tworzyw z dodatkiem poroforu chemicznego. W badaniach wykorzystano dwa modele formy do wytwarzania wyprasek schodkowych (rys. 1a, składający się z 4220 elementów skończonych) i prostopadłościennych o grubości ścianki 4 mm (rys. 1b, składający się z 4354 elementów skończonych). Modele numeryczne opracowano z zastosowaniem elementów dwuwymiarowych (trójkątnych) w przypadku gniazda formy i kanałów doprowadzających, natomiast kanały chłodzące modelowano 48 elementami jednowymiarowymi (rys. 2). Program umożliwia przeprowadzenie symulacji wtryskiwania mikrooporującego w trybach Midplane oraz Dual Domain. W pracy stosowano tryb Dual Do-



Rys. 1. Modele wyprasek wraz z elementami zestalonymi w kanałach przepływowych: a) schodkowa, b) prostopadłościenna
Fig. 1. Models of moulded parts with elements of solidified plastic in the flow runner: a) „stepped-type” part, b) „rectangular-type” part



Rys. 2. a) Układ modelowany elementami dwuwymiarowymi (gniazdo formujące i kanały doprowadzające), jednowymiarowymi (kanały chłodzące), z siatką elementów skończonych, na przykładzie formy do wytwarzania wyprasek schodkowych, b) wymiary wypraski

Fig. 2. a) Model system of moulded part with two-dimensional (cavity and runners) and one-dimensional (cooling channels) elements, with a finite element mesh, illustrated with an example of mould for manufacturing „stepped-type” parts, b) moulded part dimensions

main. Przeprowadzono symulacje wszystkich faz procesu: wtrysku, docisku i chłodzenia wyprasek. Zjawisko porowania można zaobserwować głównie w fazie docisku i chłodzenia.

Symulacje przeprowadzono w odniesieniu do dwóch tworzyw użytych w badaniach doświadczalnych i znajdujących się w bazie tworzyw programu Moldflow: polietylenu dużej gęstości PE-HD – Hostalen CG 7260 i polipropylenu PP – Moplen HP648T. Charakterystykę badanych tworzyw przedstawiono w tabeli 1. Przeprowadzone symulacje dotyczyły tworzyw bez lub z dodatkiem poroforu fizycznego – gazu porującego CO₂. Łącznie utworzono 8 modeli numerycznych.

Warunki wtryskiwania zastosowane w symulacjach przedstawiono w tabeli 2.

W doborze parametrów wtryskiwania zastosowanych w symulacjach kierowano się potencjalnymi korzyściami wynikającymi z wykorzystania zjawiska porowania. W przypadku wyprasek mikroporowatych znacznie zredukowano ciśnienie i czas cyklu w porównaniu z ciśnieniem i czasem cyklu wytwarzania wyprasek z tworzywa litego, co wymagało jednak niewielkiego wydłużenia czasu chłodzenia wyprasek mikroporowatych. W symulacjach wtryskiwania tworzyw litych przełączenie ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku następowało po wypełnieniu tworzywem 99 % objętości gniazd i kanałów doprowadzających, natomiast w przypadku tworzyw porowatych – po całkowitym ich wypełnieniu (100 %). Ciśnienie docisku tworzywa bez poroforu stanowiło 90 % ciśnienia wtrysku, natomiast tworzyw z poroforem – 40 %. W przypadku tworzyw z poroforem zredukowano czas docisku do 1 s, podczas gdy czas docisku tworzyw bez poroforu wynosił 10 s. W celu zrekompensovania skróconego czasu schładzania tworzywa w formie podczas fazy docisku wydłużono nieznacznie czas chłodzenia wyprasek porowatych. Czas całego cyklu wtryskiwania tworzyw bez poroforu wynosił 30 s, tworzyw porowatych – 25 s.

W symulacji wtryskiwania mikroporującego było konieczne wprowadzenie w programie dodatkowych założeń dotyczących procesu porowania:

- gniazdo formy jest wypełnione tworzywem w 100 % w chwili rozpoczęcia wzrostu porów,
- początkowa średnica porów wynosi 0,001 mm,
- w danej objętości tworzywa (cm³) znajduje się 10¹⁶ porów,
- ilość gazu wstępnie rozpuszczonego w tworzywie – 0,5 %.

Symulacje komputerowe pozwalają na zbadanie zjawisk reologicznych i cieplnych w procesie wtryskiwania tworzyw bez poroforu i z poroforem. W przeprowadzonej symulacji oceniano wpływ rodzaju tworzywa i założonej grubości ścianki wypraski na jej otrzymaną strukturę porowatą. Porównano wartość skurczu objętościowego wyprasek uzyskiwanych w procesie mikroporowania z wartością skurczu objętościowego wyprasek litych. Przedstawiono wybrane wyniki symulacji, uwzględniające zjawiska najbardziej istotne dla przebiegu procesu wtryskiwania i jakości wyprasek.

T a b e l a 1. Charakterystyka badanych tworzyw

T a b l e 1. Characteristics of the plastics investigated

Rodzaj tworzywa	Nazwa handlowa	Producent	Wskaźnik szybkości płynięcia (MFR), g/10 min			Temperatura mięknięcia wg Vicata, °C	
			wartość	warunki badania		metoda	
				temp., °C	obciążenie, kg	A50 (50 °C/h, 10 N)	B50 (50 °C/h, 50 N)
PE-HD	Hostalen GC 7260	Basell Polyolefins	8	190	2,16	–	72
PP	Moplen HP648T	Basell Polyolefins	53	230	2,16	154	95

Tabela 2. Warunki wtryskiwania stosowane w symulacjach komputerowych

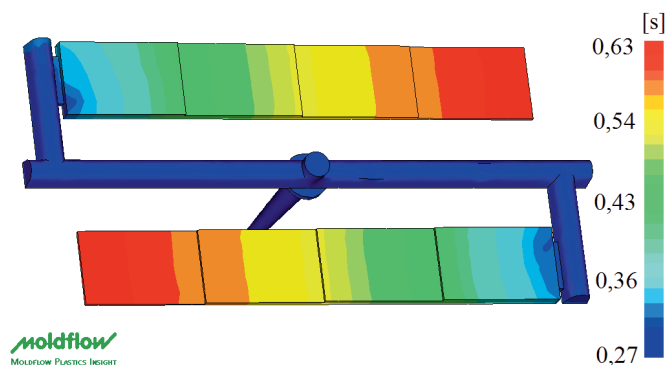
Table 2. Injection moulding conditions applied to numerical simulations

Rodzaj wypraski: WP — wypraska prostopadłościenna WS — wypraska schodkowa		Tworzywo			
		PE-HD Hostalen CG 7260		PP Moplen HP648T + MuCell	
WP	temperatura wtryskiwania, °C	240		240	
	ciśnienie docisku, MPa	24	10	18	8
	prędkość wtryskiwania, mm/s	95		95	
	czas wtrysku, s	0,83		0,82	
	czas docisku, s	10	1	10	1
	czas chłodzenia, s	19,17	23,17	19,18	23,18
WS	temperatura wtryskiwania, °C	240		240	
	ciśnienie docisku, MPa	50	28	27	
	prędkość wtryskiwania, mm/s	95		95	
	czas wtrysku, s	0,65	0,66	0,64	0,65
	czas docisku, s	10	1	10	1
	czas chłodzenia, s	19,35	23,34	19,36	23,35
	temperatura formy, °C	40		30	

WYNIKI SYMULACJI

Rysunek 3 przedstawia uzyskane wyniki symulacji komputerowej, położenie frontu strumienia tworzywa — PP Moplen HP648T z poroforem — w czasie wypełniania nim gniazd formujących. W początkowej fazie wypełniania gniazda, bezpośrednio za przewężką, jest widoczna asymetria przepływu tworzywa, zanikająca w dalszych strefach gniazda.

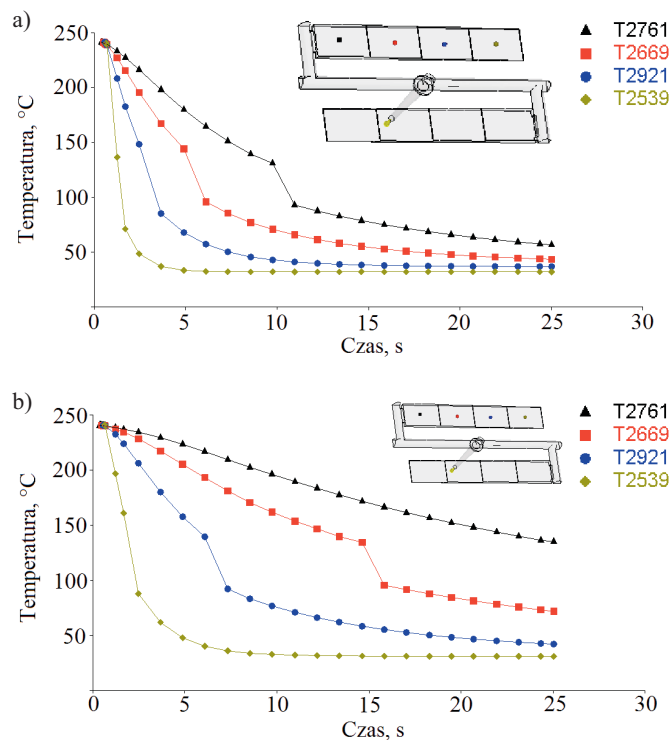
Rysunek 4 przedstawia rozkład temperatury tworzywa z poroforem w czterech częściach wypraski schodkowej w czasie cyklu wtryskiwania: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T.



Rys. 3. Położenie frontu strumienia tworzywa w fazie wypełniania gniazda formy schodkowej polipropylenem Moplen HP648T z poroforem

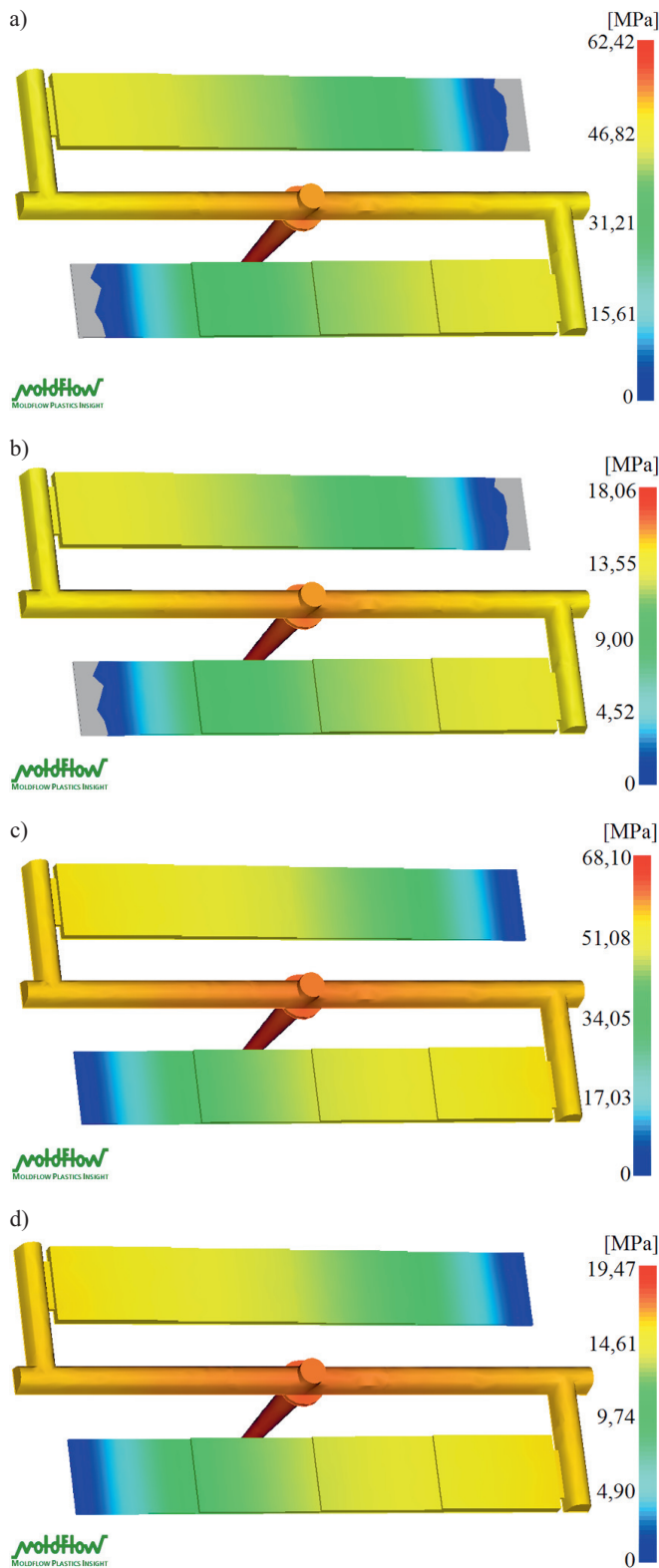
Fig. 3. Melt front position during the filling of “stepped-type” mould cavity with polypropylene Moplen HP648T with blowing agent

Polipropylen wolniej oddaje ciepło niż PE-HD, co wpływa na wydłużenie czasu ochładzania i zestalania się tworzywa w gnieździe. Szybkość ochładzania tworzywa



Rys. 4. Rozkład temperatury tworzywa z poroforem w czterech częściach wypraski schodkowej w czasie cyklu wtryskiwania: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T

Fig. 4. Temperature distribution of plastic with blowing agent in four sections of the „stepped-type” part during the injection cycle: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T



Rys. 5. Rozkład ciśnienia tworzywa w gnieździe formy schodkowej podczas przełączania ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku: a) PE-HD Hostalen CG 7260 bez poroforu, b) PP Moplen HP648T bez poroforu, c) PE-HD Hostalen CG 7260 z poroforem, d) PP Moplen HP648T z poroforem

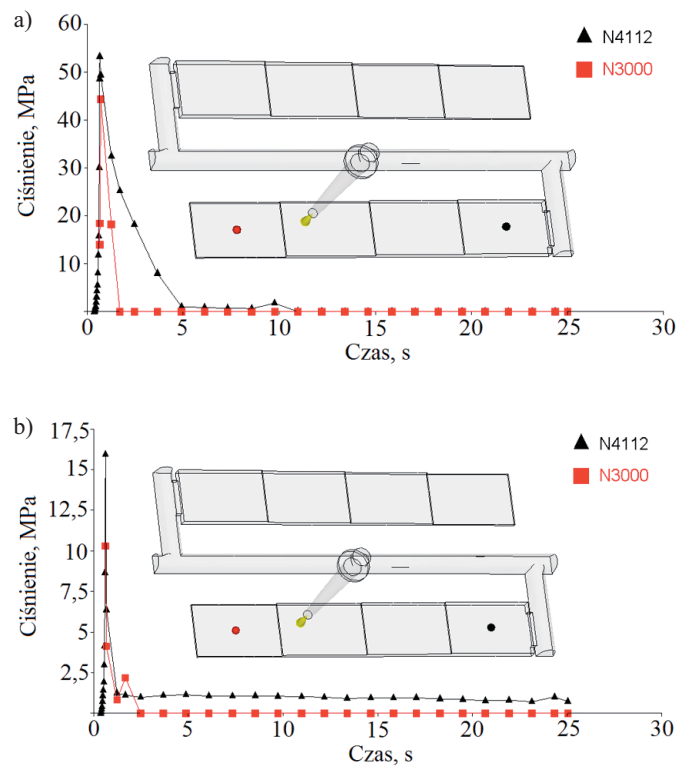
Fig. 5. Pressure distribution of plastic during V/P switchover phase, results for „stepped-type” mould: a) PE-HD Hostalen CG 7260 without blowing agent, b) PP Moplen HP648T without blowing agent, c) PE-HD Hostalen CG 7260 with blowing agent, d) PP Moplen HP648T with blowing agent

zależy od wysokości gniazda. Najszybciej tworzywo jest ochładzane w strefie gniazda o wysokości 1 mm. Wraz ze zwiększającą się wysokością gniazda, zestalające się tworzywo wolniej oddaje ciepło do formy. Nie stwierdzono istotnych różnic w rozkładzie temperatury w gnieździe w przypadku tworzywa z poroforem i bez.

Rysunek 5 przedstawia rozkład ciśnienia w gnieździe w chwili przełączenia ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku w procesie wtryskiwania tworzyw: PE-HD Hostalen CG 7260 i Moplen HP648T, z poroforem i bez niego.

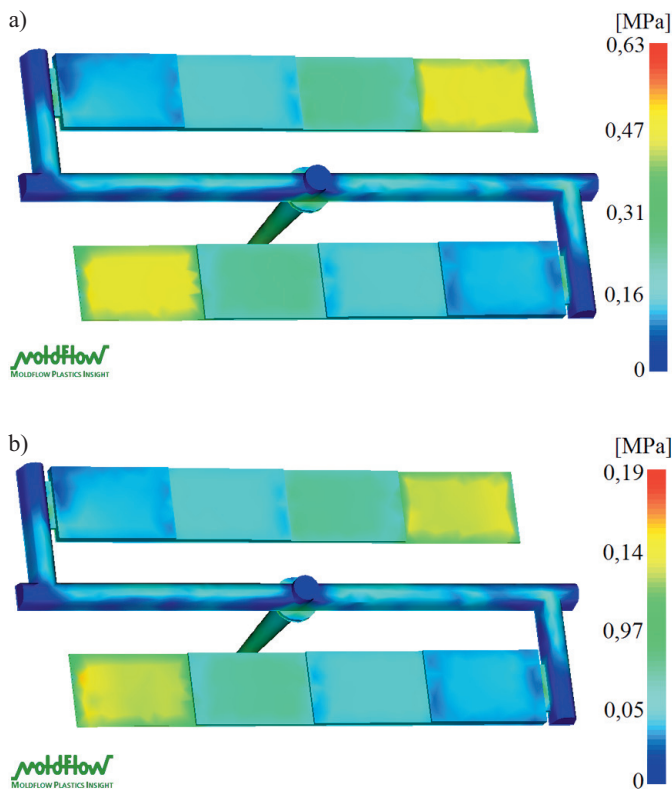
W końcowej części gniazda, w strefach o grubości 2 i 1 mm, następuje znaczny spadek ciśnienia tworzywa zarówno z poroforem, jak i bez niego. Na rozkład ciśnienia w gnieździe formującym ma również wpływ rodzaj stosowanego tworzywa. W przypadku PE-HD (rys. 5a i c) ciśnienie tworzywa w gnieździe było trzykrotnie większe niż podczas wtryskiwania tworzywa PP (rys. 5b i d). Ilustrują to również wykresy rozkładu ciśnienia tworzywa w dwóch punktach gniazda w czasie cyklu wtryskiwania (rys. 6).

Maksymalne ciśnienie tworzywa w końcowej części wypraski o grubości 1 mm wynosi, w przypadku PE-HD, 44 MPa, a w przypadku PP – 10 MPa. Może to być spowodowane znaczną różnicą wartości wskaźnika szybkości płynięcia (*MFR*) obu tworzyw. Polietylen charakte-



Rys. 6. Rozkład ciśnienia tworzywa z poroforem w dwóch punktach gniazda w czasie cyklu wtryskiwania: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T

Fig. 6. Pressure distribution of plastic with blowing agent in two points of „stepped-type” mould cavity, during injection moulding cycle: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T

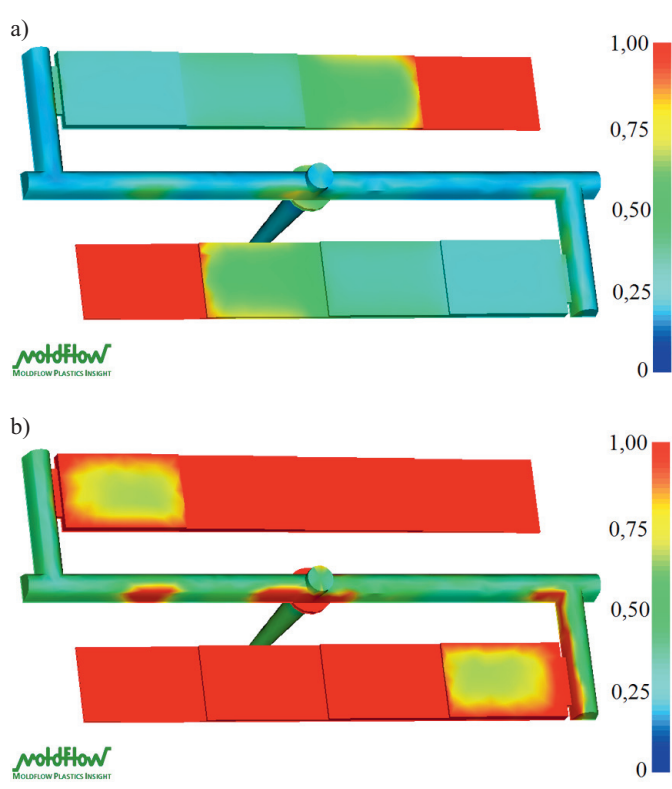


Rys. 7. Rozkład naprężeń stycznych na ściankach wyprasek schodkowych z tworzyw porowatych: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T, w fazie wypełniania gniazda
 Fig. 7. Shear stress distribution on the walls of „stepped-type” moulded parts from cellular plastics during the filling of a mould cavity: a) PE-HD Hostalen CG 7260, b) PP Moplen HP648T

ryzuje się mniejszą wartością *MFR* niż polipropylen, w rezultacie do pokonania oporów przepływu tworzywa PE-HD w gnieździe jest konieczne zwiększenie ciśnienia, co wpływa również na wartość naprężeń stycznych w wypraskach (rys. 7).

W przypadku wtryskiwania PE-HD z poroforem występują dwukrotnie większe wartości naprężenia stycznego na ściankach wypraski niż w przypadku wtryskiwania PP z poroforem. Wartość naprężeń stycznych zależy od wysokości gniazda formującego. W strefach gniazda o małej wysokości podczas przepływu tworzywa występują znacznie większe naprężenia styczne niż w pozostałych strefach. Jest to związane z dużą prędkością przepływu oraz z szybkością ochładzania tworzywa w tych obszarach. Lepkość tworzywa zwiększa się wykładniczo wraz z obniżeniem temperatury, dlatego też w obszarach o małej wysokości gniazda, gdzie ochładzanie jest bardziej intensywne, tworzywo ciekłe napotyka na duże opory podczas przepływu. PE-HD cechuje ponadto większa lepkość niż PP. Naprężenia styczne są funkcją temperatury i szybkości przepływu tworzywa oraz wysokości gniazda.

Wysokość gniazda formującego ma wpływ na przebieg zestalania tworzywa w formie. Na rysunku 8 przedstawiono udział zestalonego tworzywa PE-HD z porofo-



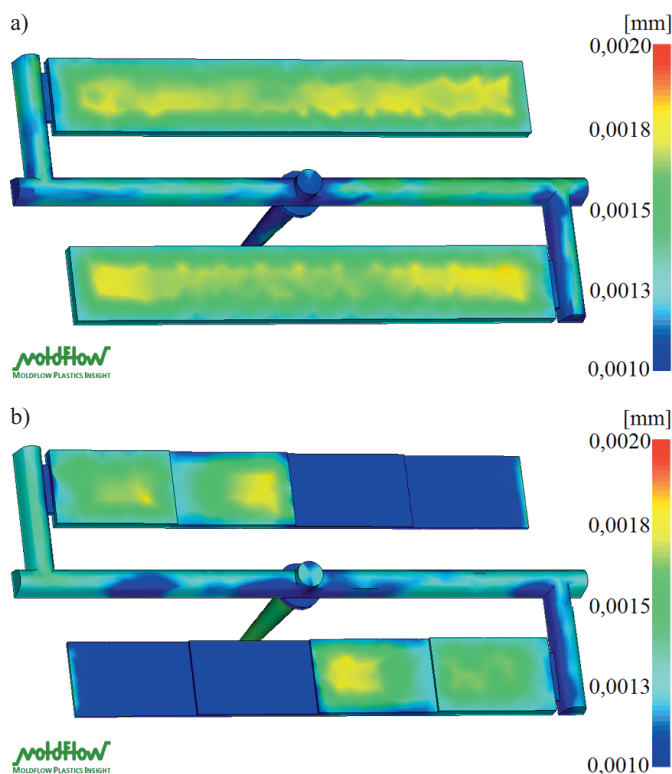
Rys. 8. Udział zestalonego tworzywa PE-HD Hostalen CG 7260 z poroforem w formie schodkowej w czasie: a) 2,46 s, b) 8,56 s liczonym od początku cyklu wtryskiwania
 Fig. 8. Frozen layer fraction of PE-HD Hostalen CG 7260 with blowing agent in „stepped-type” mould in: a) 2.46 s, b) 8.56 s measured from the beginning of the injection cycle

rem w odniesieniu do całej objętości gniazda, w czasie 2,46 i 8,56 s od rozpoczęcia cyklu wtryskiwania.

Największy udział tworzywa zestalonego w czasie 2,46 s występuje w obszarze gniazda o wysokości 1 mm. W pozostałych obszarach udział tworzywa zestalonego w tym czasie jest mniejszy. W ciągu 8,56 s od rozpoczęcia cyklu wtryskiwania tworzywo jest już całkowicie zestalone w trzech strefach o wysokości 1, 2 i 3 mm, natomiast w części o największej wysokości jest jeszcze pewien udział tworzywa niezestalonego. Im większa jest wysokość gniazda, tym dłuższy jest czas potrzebny do zestalania tworzywa. Czas chłodzenia całej wypraski ustala się na podstawie czasu potrzebnego do zestalania tworzywa w najgrubszej jej części.

Na tym etapie badań wykonano symulacje rozkładu porów o określonej średnicy w środkowym wzdłużnym przekroju wyprasek wtryskowych, z wykorzystaniem modeli formy do wytwarzania wyprasek prostopadłościennych i schodkowych.

Z rysunków 9 i 10 wynika, że w środkowej części wyprasek (w jej rdzeniu) występują pory o największej średnicy (0,0018 mm). W przypadku wyprasek prostopadłościennych pory w rdzeniu są rozłożone równomiernie wzdłuż wypraski. Pory o mniejszej średnicy występują w obszarze naskórka wypraski.



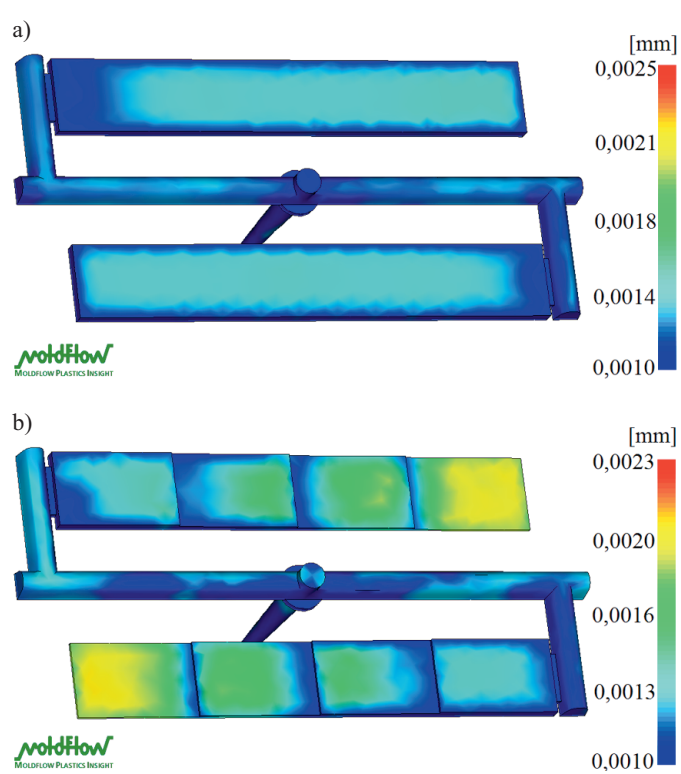
Rys. 9. Rozkład porów o określonej średnicy w środkowej płaszczyźnie przekroju wyprasek: a) prostokątnej, b) schodkowej; tworzywo PE-HD Hostalen CG 7260

Fig. 9. Bubble diameter distribution in the central plane of the moulded part section: a) „rectangular-type”, b) „stepped-type”; for PE-HD Hostalen CG 7260 plastic

W wyprase schodkowej z PE-HD pory o największej średnicy (0,0018 mm) występują jedynie w częściach wypraski o grubości 3 i 4 mm, natomiast pory w pozostałych częściach mają mniejszą średnicę (rys. 9).

W wyprase z PP największe pory występują w częściach o grubości 1, 2 i 3 mm. Wyniki symulacji przedstawiające rozkład ciśnienia tworzywa w gnieździe formy (rys. 5) i rozkład naprężeń stycznych w gnieździe formy (rys. 7) wykazały, że w przypadku tworzywa PE-HD w strefach o grubości 1 i 2 mm, zarówno ciśnienie ciekłego tworzywa, jak i naprężenia styczne osiągają duże wartości, co może utrudniać proces porowania i powodować występowanie porów o małej średnicy lub ich brak w tych częściach wyprasek. W wypraskach z PP w strefach 1 i 2 mm naprężenia styczne mają mniejszą wartość – sprzyjającą rozrostowi porów – niż w wypraskach z PE-HD.

W badaniach własnych [33] polipropylenu częściowo transparentnego – Malen P J-400 firmy Basell Orlen – oraz chemicznego poroforu egzotermicznego – Adcol-blow UP-0EB-X1099 – przeprowadzonych z wykorzystaniem wtryskarki KM65-160 C4 firmy Krauss-Maffei o sile zamykania 65 ton (650 kN), strukturę porowatą zaobserwowano jedynie w strefach wyprasek o grubości 3 oraz 4 mm, w których warunki ścinania tworzywa umożliwiły powstanie i rozrost porów. Największą efek-



Rys. 10. Rozkład porów o określonej średnicy w środkowej płaszczyźnie przekroju wyprasek: a) prostokątnej, b) schodkowej; tworzywo PP Moplen HP648T

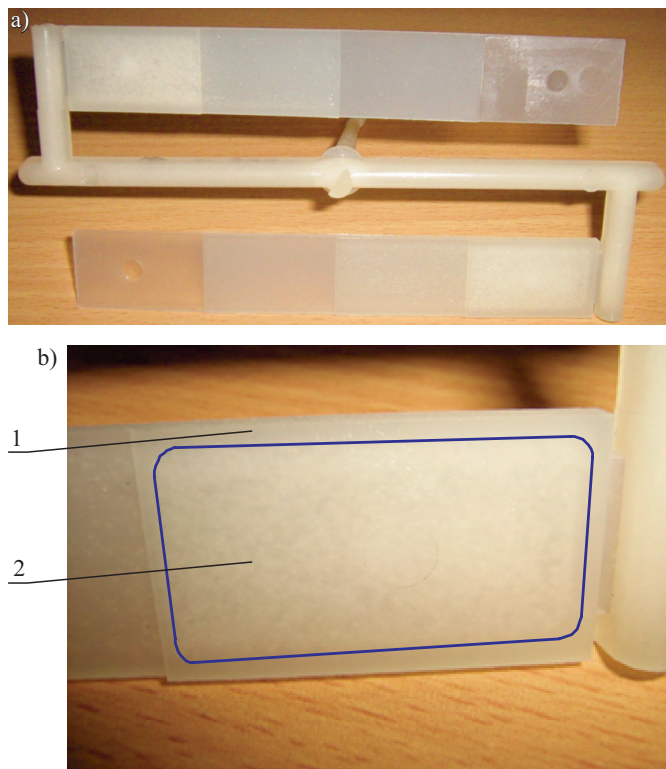
Fig. 10. Bubble diameter distribution in the central plane of the moulded part section: a) „rectangular-type”, b) „stepped-type”; for PP Moplen HP648T plastic

tywność porowania uzyskano w strefie o największej grubości.

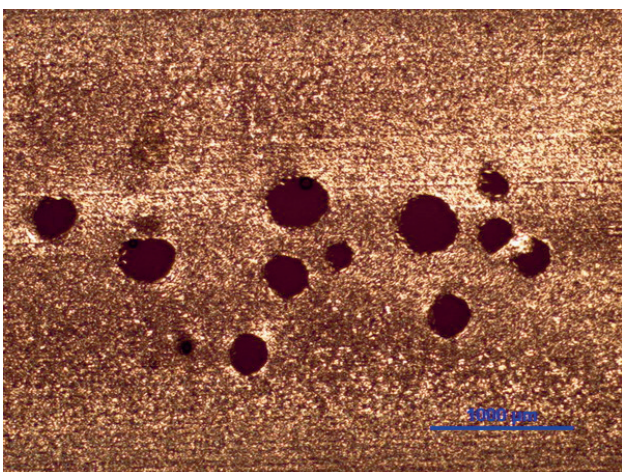
Zastosowanie w badaniach tworzywa częściowo transparentnego umożliwiło łatwą obserwację struktury porowatej. Wykazano, że w strefie o grubości 4 mm w rdzeniu występowały liczne pory o różnej średnicy, natomiast warstwy przypowierzchniowe były lite (rys. 11, 12). W strefie tej (4 mm) czas zestalenia tworzywa był najdłuższy, a intensywność ścinania najmniejsza, co sprzyjało rozrostowi porów. W strefie o grubości 3 mm w rdzeniu wypraski były widoczne jedynie nieliczne pory, natomiast w strefach o grubości 2 mm i 1 mm porów nie zaobserwowano. Proces porowania był w nich utrudniony ze względu na intensywnie ścinanie i szybkie ochładzanie tworzywa.

Na rysunku 13 porównano wartości pierwotnego objętościowego skurczu przetwórczego wyprasek z PE-HD, litych i porowatych.

W przypadku wyprasek litych skurcz wypraski wynosił ok. 2,5 %. Jedynie w końcowej strefie o grubości 1 mm skurcz był większy (wynosił 8,8 %), co mogło wynikać z małego ciśnienia tworzywa (rys. 5). W przypadku tworzywa z poroforem skurcz w strefach o grubości 4, 3 i 2 mm przybierał wartość ujemną, ok. – 3 %, co świadczy o zwiększeniu objętości wypraski porowatej w stosunku do wymiarów gniazda formującego, spowodowanym



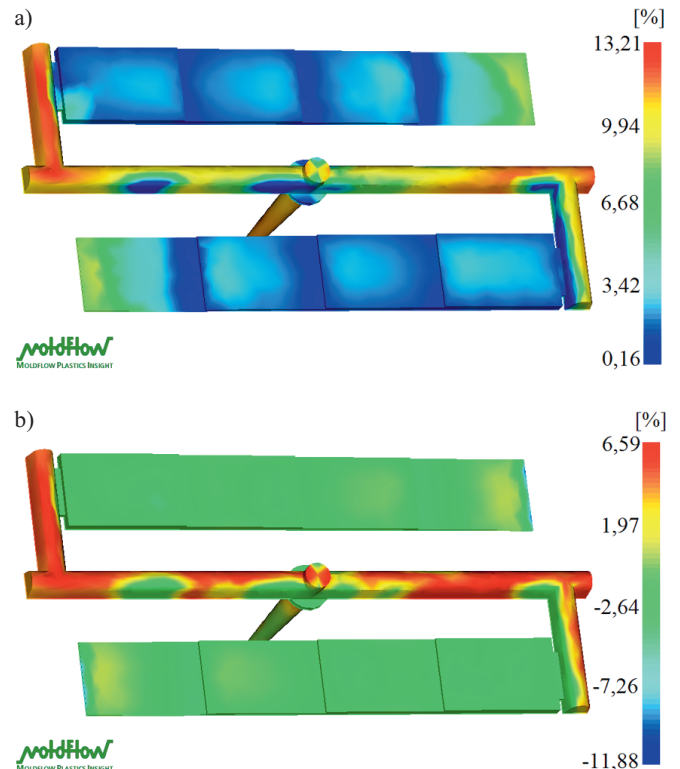
Rys. 11. Wygląd powierzchni strefy wypraski z PP z 1-proc. zawartością poroforu: a) z wyszczególnionym fragmentem o grubości 4 mm, z zaznaczonym obszarem występowania porów, b): 1 – lita warstwa przypowierzchniowa, 2 – porowaty rdzeń
 Fig. 11. Surface appearance of the moulded part from PP containing 1% blowing agent: a) with a specified fragment with thickness of 4 mm and the marked area of pores, b): 1 – solid skin layer, 2 – porous core



Rys. 12. Morfologia wyprasek z polipropylenu z poroforem; próbki wycięte ze strefy o grubości 4 mm wypraski z PP zawierającego 0,75% poroforu

Fig. 12. Morphology of the moulded part from polypropylene with blowing agent; the samples cut from an area with 4 mm thickness of the part from PP containing 0.75% blowing agent

zbyt intensywnym porowaniem tworzywa. W strefie o grubości 1 mm skurcz był niewielki i wynosił 0,6%. Takie



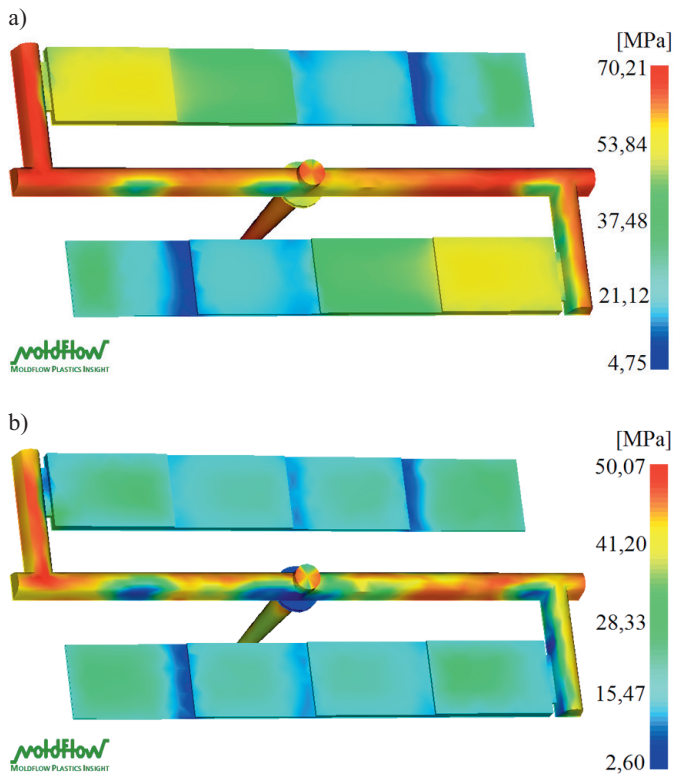
Rys. 13. Skurcz objętościowy pierwotny wyprasek schodkowych z PE-HD Hostalen CG 7260: a) bez poroforu, b) z poroforem
 Fig. 13. Volumetric shrinkage at ejection of „stepped-type” moulded parts from PE-HD Hostalen CG 7260: a) without blowing agent, b) with blowing agent

wyniki sugerują, że należy skorygować warunki wtryskiwania tworzywa z poroforem i dobrać je odpowiednio do grubości ścianki wypraski tak, aby uzyskiwane wypraski charakteryzowały się możliwie małym, równomiernym skurczem.

Rysunek 14 przedstawia rozkład naprężeń własnych powstałych w wypraskach wytworzonych z PP bez poroforu oraz z poroforem, w końcowej fazie chłodzenia wypraski, przed otwarciem formy.

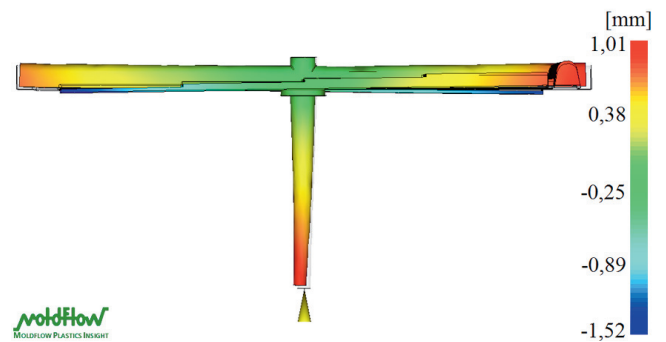
Największe wartości naprężeń własnych występują w obszarach wyprasek o grubości 4 mm. Naprężenia własne w środkowych obszarach wyprasek porowatych są dwukrotnie mniejsze niż w środkowych obszarach wyprasek litych, co wskazuje na to, że wprowadzenie gazu do tworzywa sprzyja relaksacji naprężeń. Małe wartości naprężeń własnych w wypraskach porowatych są rezultatem zastosowania mniejszego ciśnienia docisku i krótszego czasu jego trwania, niż w przypadku wyprasek litych. Jednofazowy roztwór ciekłego tworzywa z gazem ma ponadto mniejszą lepkość niż lite tworzywo, co ułatwia wypełnianie gniazda formy wtryskowej. W procesie MuCell lepkość tworzywa ciekłego zmniejsza się nawet do 30% (zazwyczaj 12–15%) [30].

W warunkach małych wartości naprężeń własnych w wypraskach powstają mniejsze odkształcenia, istotna przy tym jest symetria przepływu tworzywa w gnieździe (rys. 15).



Rys. 14. Rozkład naprężeń własnych w wypraskach schodkowych z PP Moplen HP648T: a) bez porofooru, b) z porofoorem
 Fig. 14. Distribution of residual stresses in „stepped-type” parts from PP Moplen HP648T: a) without blowing agent, b) with blowing agent

Odształcenia wypraski wytworzonej z PP z porofoorem, wywołane nierównomiernymi naprężeniami włas-



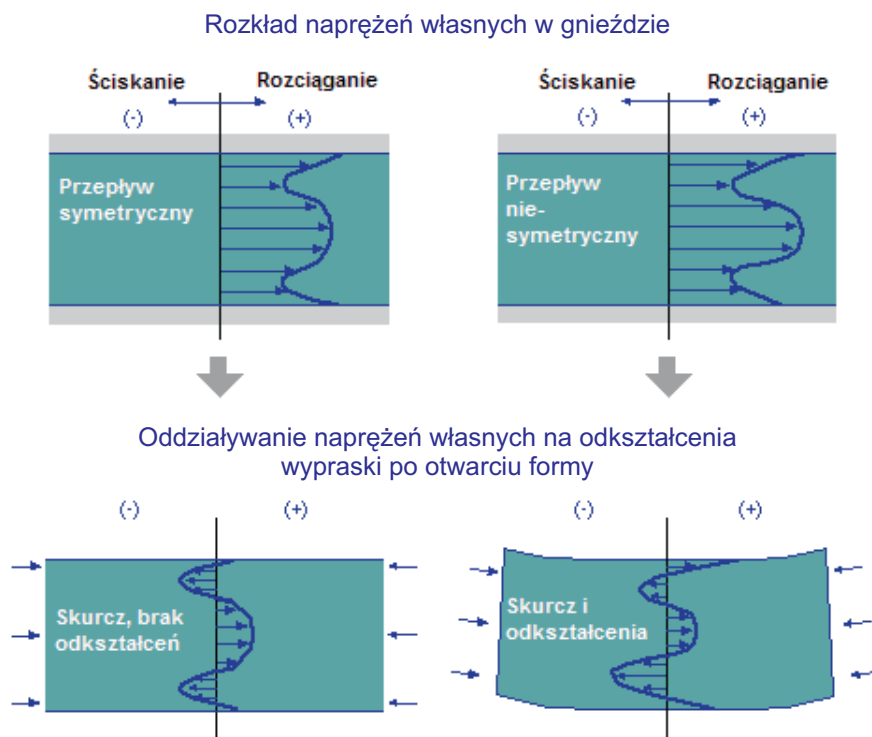
Rys. 16. Odształcenia wypraski wywołane nierównomiernymi naprężeniami własnymi, powstałymi na skutek różnych warunków ścinania tworzywa w poszczególnych strefach gniazda formującego, PP Moplen HP648T z porofoorem

Fig. 16. Moulded part deformation caused by nonuniform residual stress generated by differences in plastic shear conditions in various zones of the mould cavity, PP Moplen HP648T with blowing agent

nymi, powstałymi na skutek różnych warunków ścinania tworzywa w poszczególnych strefach wypraski, przedstawiono na rys. 16. Wypraska w przekroju wzdłużnym jest niesymetryczna.

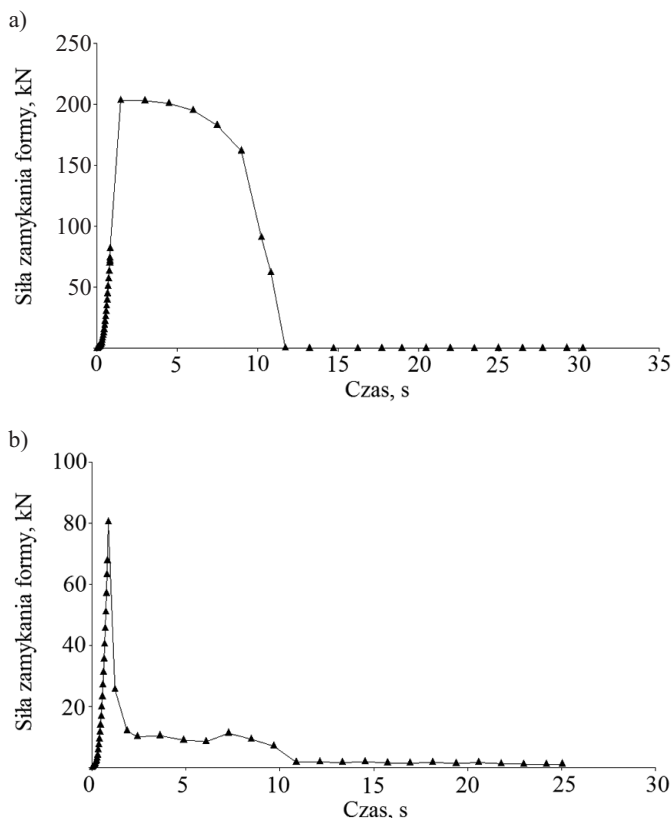
Odształcenie wyprasek schodkowych, o wartości ujemnej względem osi z, występuje niezależnie od rodzaju tworzywa, zastosowania porofooru bądź jego braku i jest zależne od warunków przepływu tworzywa w gnieździe.

Ważną zaletą procesu wtryskiwania mikroporującego jest redukcja siły zamykania formy. Na rysunku 17



Rys. 15. Wpływ naprężeń własnych na skurcz i kształt wypraski [34]

Fig. 15. Effect of residual stress on the shrinkage and shape of the moulded part [34]



Rys. 17. Zmiana siły zamykania formy w czasie cyklu wtryskiwania tworzywa PE-HD Hostalen CG 7260: a) bez porofooru, b) z porofoorem

Fig. 17. Change of mould clamping force during the injection cycle for PE-HD Hostalen CG 7260: a) without blowing agent, b) with blowing agent

przedstawiono zmiany wartości tej siły w czasie w procesie wtryskiwania tworzywa PE-HD bez porofooru oraz z porofoorem.

Z wykresów wynika, że zastosowanie porofooru umożliwiło zmniejszenie siły zamykania formy z 210 kN (wypraski lite) do 80 kN (wypraski porowate). Ponadto krótszy czas docisku i zmniejszone ciśnienie docisku podczas wtryskiwania tworzywa z porofoorem wpłynęło na skrócenie czasu, w którym jest używana duża siła zamykania formy. W zastosowaniach praktycznych, przy zmianie wartości siły zamykania, w formie muszą być zainstalowane czujniki ciśnienia. W przypadku, gdy taka instalacja czujników jest niemożliwa, zmniejszenie siły zamykania formy należy ustalić na drodze doświadczalnej.

PODSUMOWANIE

Z badań symulacyjnych wynika, że wysokość gniazda formującego wpływa w istotny sposób na rozkład temperatury i ciśnienia tworzywa w gnieździe, wielkość i rozkład porów w wypraskach, a tym samym na jakość wyprasek porowatych. Zastosowanie metody wtryskiwania mikroporującego MuCell, z prawidłowo dobrany-

mi warunkami procesu, pozwala na znaczne zredukowanie czasu docisku i ciśnienia docisku, a w efekcie czasu całego cyklu wtryskiwania, i umożliwia uzyskanie wyprasek o małym skurczu przetwórczym. Dodatkową korzyścią jest wynikająca z tego oszczędność energii. Wykazano, że dzięki zastosowaniu porofooru fizycznego zredukowano siłę zamykania formy o ponad 50 %. Podobne efekty można uzyskać w procesie wtryskiwania porującego z wykorzystaniem porofoarów chemicznych [35–38].

Rozkład ciśnienia ciekłego tworzywa w formie jest zależny od jego lepkości, duże znaczenie ma zatem wskaźnik szybkości płynięcia tworzywa. Podczas wtryskiwania PE-HD, o małej wartości *MFR*, w gnieździe formy występuje większe ciśnienie tworzywa ciekłego, ograniczające rozrost porów, w szczególności w częściach gniazda o wysokości 1 i 2 mm. Jest więc konieczne stosowanie większej siły zamykania formy. Różna jest również szybkość ochładzania PE-HD i PP w formie. Wypraski z polipropylenu wymagają dłuższego i bardziej intensywnego chłodzenia niż wypraski z PE-HD. Nie stwierdzono istotnych różnic w przemieszczaniu się frontu strumieni badanych tworzyw w gnieździe, zarówno w przypadku tworzyw litych, jak i z porofoorem.

Lite wypraski z PP charakteryzują się większym skurczem objętościowym pierwotnym niż wypraski z PE-HD. W przypadku obu tworzyw zastosowanie porofooru umożliwia wyeliminowanie skurczu przetwórczego. Naprężenia własne występujące w wypraskach litych z PE-HD są mniejsze niż w wypraskach z PP. Dodanie porofooru wpływa na zredukowanie naprężeń własnych w wypraskach zarówno z polietylenu, jak i polipropylenu.

W pracach [33, 38] wykazano, że dodatek porofoarów chemicznych do tworzyw termoplastycznych umożliwia uzyskanie struktury porowatej w wypraskach wtryskowych o grubości ścianki większej niż 3 mm. Dostateczna efektywność porowania występuje także w przypadku wyprasek o grubości ścianki 4 mm. Pory uzyskiwane w procesie porowania chemicznego mają większą średnicę i są mniej liczne niż powstające w procesie wtryskiwania mikroporującego. Możliwość otrzymania struktury porowatej jedynie w wypraskach grubościennych stanowi ograniczenie technologiczne stosowania porofoarów chemicznych.

Brak jednoznacznego przełożenia wyników symulacji numerycznych procesu wtryskiwania mikroporującego z wykorzystaniem porofoarów fizycznych na rezultaty uzyskiwane w procesie porowania z udziałem porofoarów chemicznych, stwarza konieczność poszerzenia funkcji symulacyjnych programów komputerowych w zakresie wtryskiwania porującego.

LITERATURA

- [1] Bociąga E.: „Specjalne metody wtryskiwania tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2008.
- [2] Garbacz T., Tor A.: *Polimery* 2007, 52, 286.

- [3] Jingyi Xu: *Soc. Plast. Eng.* **2009**.
<http://dx.doi.org/10.1002/spepro.000059>
- [4] Bravo V.L., Hrymak A.N.: *Int. Polym. Proc.* **2005**, 20, 149.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.1879>
- [5] Osswald T.A., Turng L.S., Gramann P.J.: "Injection Molding Handbook", Hanser Publisher, Munich, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati 2001.
- [6] Hörr M., Schönherr O.: „Wykorzystanie zalet ekonomicznych technologii MuCell”, Materiały techniczne firmy Ticona Kelsterbach.
- [7] Hwang S.S., Chen S.Ch., Chung M.H.: "Study on the Mechanical Properties of Microcellular Injection Molded Parts", ANTEC 2005, mat. konf., str. 776.
- [8] MuCell Process, <http://www.trexel.com> (24.01.2014)
- [9] Ergocell. Combining Stability with Lightness, <http://www.dpg.com> (24.01.2014)
- [10] Błędzki A.K., Faruk O., Kirschling H., Klihn J., Jaszkiwicz A.: *Polimery* **2006**, 51, 697.
- [11] Park Ch.B.: "The Fundamentals of Microcellular Foaming in Injection Molding", The Polymer Processing Society Eighteenth Annual Meeting, Guimaraes 2002, mat. konf., str. 532.
- [12] Lin Ch.K., Chen S.H., Liou H.Y., Tian Ch.Ch.: "Study on Mechanical Properties of ABS Parts in Microcellular Injection Molding Process", ANTEC 2005, mat. konf., str. 708.
- [13] Kramschuster A., Cavitt R., Ermer D., Chen Z., Turng L.S.: "Quantitative Study of Shrinkage and Warp Behavior for Microcellular and Conventional Injection Molding", The Polymer Processing Society Twenty First Annual Meeting, Leipzig 2005, SL2-20.
- [14] Gong S., Yuan M., Chandra A., Kharbas H., Osorio A., Turng L.S.: *Int. Polym. Proc.* **2005**, 20, 202.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.1883>
- [15] Bociąga E.: „Wtryskiwanie mikroporujące (MuCell)” w pracy zbiorowej „Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych” (red. Koszul J., Bociąga E.), Częstochowskie Wydawnictwo Archidiec. Regina Poloniae, Częstochowa 2006, str. 36.
- [16] Błędzki A.K., Kirschling H., Klihn J.: *Mechanika* **2006**, z. 6-M, 47.
- [17] "Plastic Processing. Opitifoam", <http://www.sulzerchemtech.com> (24.01.2014)
- [18] Guanghong H., Yu W.: "Microcellular Foam Injection Molding Process, Some Critical Issues for Injection Molding", <http://dx.doi.org/10.5772/34513>
- [19] Xu J., Pierick D.: "Microcellular Foam Processing in Reciprocating", <http://www.trexel.com/techpp/recscrew.pdf> (24.01.2014)
- [20] Bieliński M.: „Techniki porowania tworzyw termoplastycznych”, Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004.
- [21] Hongbin Wu: "Microcellular Injection Moulding for an Oesophageal Implant", Rozprawa doktorska, Lehrstuhl für Medizintechnik Technische Universität München, 2009.
- [22] Lee S.-T.: "Foam Extrusion, Principles and Practice", CRC Press, Washington, D.C. 2000.
- [23] Mahmoodi M., Behraves A.H., Rezavand S., Golzar M.: *Polym. Eng. Sci.* **2010**, 50, 561.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.21565>
- [24] Qin X., Thompson M.R., Hrymak A.N., Torres A.: *Polym. Eng. Sci.* **2005**, 45, 1108. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20371>
- [25] Throne J.L.: "Thermoplastic Foam Extrusion: an Introduction", Carl Hanser Verlag, Munich 2004, str. 13.
- [26] Weaire D., Hutzler S.: "The Physics of Foams", Oxford University Press, New York 1999.
- [27] Moldex3D Launches Novel Simulation of MuCell® Process Technology in R11: <http://www.moldex3d.com/en/newsletter/mucell-process-technology-in-r11> (24.01.2014)
- [28] Simulation models, <http://help.autodesk.com/cloudhelp/2014/ENU/MoldflowComm/files/GUID-EC0F471C-A2C5-4461-9C83-B62B85936166.htm> (24.01.2014)
- [29] Zhai M., Xie Y.: *J. Polym. Eng.* **2011**, 29, 441.
<http://dx.doi.org/10.1515/POLYENG.2009.29.7.441>
- [30] Lankisch T.: "Correlation Study Using Moldflow MuCell® for Lightweighting", Autodesk University 2013, Prezentacja techniczna firmy Autodesk.
- [31] Jingyi X.: "Microcellular Injection Molding", Wiley New Jersey 2010, str. 472.
- [32] Zhao L., Chen J., Liu T., Xi Z., Lih-Sheng T.: "Experimental and Numerical Study of Foaming Injection Molding of Polypropylene/nano-Calcium Carbonate Composites by Supercritical Carbon Dioxide". [http://files.eventsential.org/61198b3c-1544-484a-a2b1-01ec6810ec04/event-58/29265064-Ling%20ZHAO%20No.126%20for%20SPE%20China%20TopCon\[1\].pdf](http://files.eventsential.org/61198b3c-1544-484a-a2b1-01ec6810ec04/event-58/29265064-Ling%20ZHAO%20No.126%20for%20SPE%20China%20TopCon[1].pdf) (24.01.2014)
- [33] Bociąga E., Palutkiewicz P., Szymański D.: „Wybrane właściwości i struktura wyprasek wtryskowych z polipropylenu z poroforem chemicznym” w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe”, CWA Regina Poloniae, Częstochowa 2008, str. 15.
- [34] "Residual Stress: Process-induced vs. In-cavity Residual Stress", <http://www.scudc.scu.edu/> (24.01.2014)
- [35] Bociąga E., Palutkiewicz P.: *Polimery* **2012**, 57, 38.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2012.038>
- [36] Bociąga E., Palutkiewicz P.: *Polym. Eng. Sci.* **2013**, 53, 780.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23316>
- [37] Garbacz T.: *Polimery* **2013**, 58, 30.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.295>
- [38] Palutkiewicz P.: „Badanie zjawisk w procesie wytwarzania wyprasek wtryskowych z tworzyw termoplastycznych z poroforem”, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2011.