

Elżbieta BOCIĄGA, Paweł PALUTKIEWICZ*

Politechnika Częstochowska, Zakład Przetwórstwa Polimerów

* e-mail: palutkiewicz@ipp.pcz.pl

Wtryskiwanie mikroporujące

Streszczenie. W niniejszej pracy szerzej przedstawiono jedną z metod wtryskiwania niekonwencjonalnego, pozwalającą na uzyskanie wyprasek porowatych, a mianowicie wtryskiwanie mikroporujące z zastosowaniem poroforów fizycznych. Może ono być przeprowadzane przy użyciu konwencjonalnych wtryskarek wyposażonych układ uplastyczniający z system wtryskiwania gazu w stanie nadkrytycznym.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie porujące, wtryskiwanie mikroporujące, mikroporowanie

MICROCELLULAR INJECTION MOULDING

Summary. This work broadly shows one method of an unconventional injection moulding process, which allows to obtain porous moulded parts, namely microcellular injection moulding, using physical blowing agents. It may be carried out using a conventional injection moulding plasticizing system equipped with a supercritical gas injection system.

Keywords: foamed moulded parts, microcellular injection moulding, microporous

1. WSTĘP

Tworzywa porowate są szeroko wykorzystywane w wielu dziedzinach, m.in. na elementy izolujące, filtry, opakowania, itp. Porofory są również stosowane jako modyfikatory procesu wtryskiwania, np. w celu zlikwidowania zapadnięć technologicznych wyprasek, spowodowanych ich skurczem [1]. Ze względu na charakter rozkładu porofory chemiczne dzieli się na egzotermiczne (najczęściej pochodzenia organicznego) i endotermiczne (najczęściej pochodzenia nieorganicznego) [1-8]. Wtryskiwanie porujące z użyciem poroforów chemicznych jest stosowane ze względu na niskie nakłady na wyposażenie techniczne, proces może odbywać się przy wykorzystaniu wtryskarek konwencjonalnych. Porofory fizyczne dzieli się na gazy wprowadzane pod ciśnieniem oraz lotne ciecze, ulegające wrzeniu w temperaturze przetwórstwa. Do poroforów fizycznych zalicza się również mikrosfery składające się z polimerowej otoczki, wewnątrz której

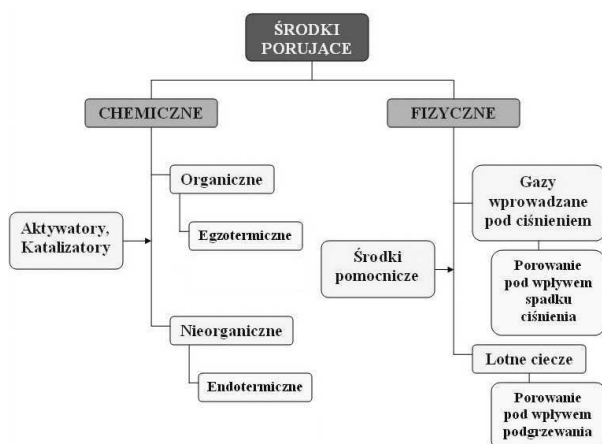
znajduje się środek porujący. Podział środków porujących przedstawiono na rysunku 1.

Porofory fizyczne oznaczane w literaturze angielskiej skrótem PBA (physical blowing agent), np. węglowodory i ich pochodne, azot, dwutlenek węgla, występują w postaci gazu, gazu w stanie nadkrytycznym lub cieczy. Wprowadzane są pod ciśnieniem do ciekłego tworzywa w układzie uplastyczniającym maszyny przetwórczej lub bezpośrednio do gniazda formującego. Efektywność tej metody zależy w dużym stopniu od rodzaju i budowy układu dozowania i instalacji doprowadzającej porofor [2,4,9].

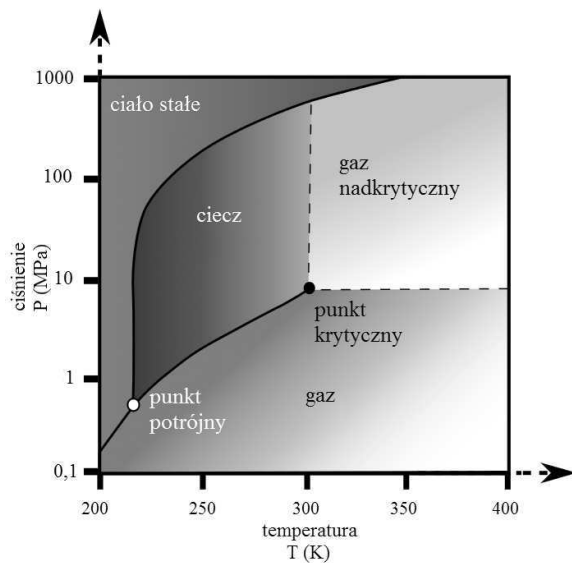
Jedną z odmian procesu wtryskiwania porującego z wykorzystaniem poroforów fizycznych jest wtryskiwanie mikroporujące.

W procesie wtryskiwania mikroporującego otrzymuje się wypraski o jednorodnej strukturze porowatej. Rozmiary uzyskanych porów są bardzo małe ($0,1 \div 10 \mu\text{m}$) [2,10,11], a ich ilość zmienia się w zakresie od 10^7 do 10^{15} porów w 1 cm^3 tworzywa [2,12]. Metoda ta znana jest od 1980 roku i została wynaleziona przez Massachusetts Institute of Technology, a następnie rozwijana na skalę przemysłową przez firmę Trexel Inc. w USA pod nazwą MuCell [2,13,14,15]. Bazuje ona na termodynamicznej niestabilności gazów nadkrytycznych (Rys. 2) dodawanych pod odpowiednim ciśnieniem do tworzywa uplastycznionego [6]. Opracowane zostały odmiany wtryskiwania mikroporującego Optifoam firmy Sulzer Chemtech AG (Szwajcaria) oraz ErgoCell firmy Demag (Niemcy) [2,16-20].

Strukturę mikroporowatą tworzywa uzyskuje się też w innych metodach przetwórstwa, np. wytłaczaniu i wytłaczaniu z rozdmuchiowaniem [7,8]. Wtryskiwanie mikroporujące nie było powszechnie stosowane na skalę przemysłową do 1998 roku, kiedy to w metodzie tej zaczęto wykorzystywać wtryskarki tłokowe. Na jakość uzyskiwanej struktury mikroporowatej wpływa szereg parametrów przetwórstwa, rodzaj stosowanego tworzywa oraz poroforu (np. porofor w postaci dwutlenku węgla



Rys. 1. Podział środków porujących (opracowanie własne na podstawie [6])

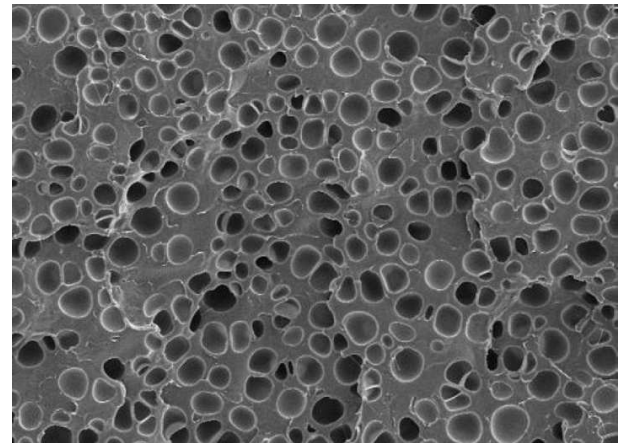


Rys. 2. Diagram fazowy temperatura–ciśnienie dla CO₂ [21]

pozwała na uzyskiwanie gęsto ułożonych porów, co jest trudniejsze w przypadku zastosowania azotu jako poroforu). Uzyskiwane w tym procesie pory nie są widoczne gołym okiem, jak ma to miejsce w przypadku stosowania poroforów chemicznych. W celu obserwacji struktury porowatej i zmian w niej występujących konieczne jest wykorzystanie mikroskopii skaningowej (SEM) (Rys. 3) [21].

W procesie wtryskiwania mikroporującego wyróżnia się 4 podstawowe etapy (Rys. 4) [22]:

1. Rozpuszczenie (dyfuzja) gazu w uplastycznionym tworzywie: do zapoczątkowania reakcji mikroporowania wymagana jest pewna minimalna, graniczna ilość gazu rozpuszczonego w tworzywie. Zbyt mała ilość gazu dostarczanego na tym etapie będzie skutkowałą niepowodzeniem przebiegu procesu.
2. Zarodkowanie (nukleacja): tworzenie się dużej liczby zarodków porów (większa ilość niż w przypadku porowania chemicznego). Do utworzenia dużej liczby jednakowych porów jest wymagany duży i szybki spadek ciśnienia. Nukleacja jednofazowego roztworu tworzywa z gazem wtryskiwanego do formy wystę-

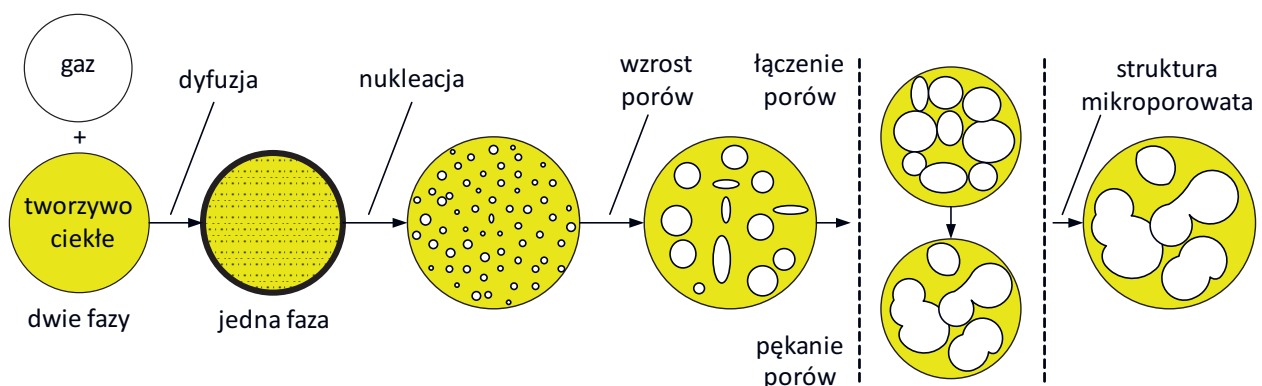


Rys. 3. Przykład struktury mikroporowatej polistyrenu [21]

puje zazwyczaj przy spadku ciśnienia mieszaniny większym od 1 GPa/s.

3. Wzrost porów: pory są rozszerzane przez dyfuzję gazu do ich wnętrza. Na tym etapie możliwa jest regulacja wzrostu porów poprzez utrzymywanie odpowiedniego ciśnienia i temperatury mieszaniny.
4. Ostateczne kształtowanie wypraski w formie wtryskowej: mikropory dalej rozrastają się lub zestalają podczas wypełniania gniazda, w zależności od warunków procesu. Mogą też łączyć się ze sobą.

Aby proces mikroporowania przebiegł w sposób optymalny, wszystkie cztery etapy muszą występować w trakcie posuwistego ruchu ślimaka, czyli w trakcie wtrysku i wypełniania gniazda formy. Temperatura i ciśnienie roztworu jednofazowego musi być utrzymywana w pewnym stałym zakresie, aby uniknąć porowania w układzie uplastyczniającym (konieczność stosowania zamykanych dysz). Stopień dyfuzji wymagany do utworzenia roztworu jednofazowego dla roztworu gaz/polimer, zależy od trzech głównych czynników: stanu poroforu, temperatury i szybkości ścinania. Ślimak wtryskarki musi zapewnić właściwą szybkość ścinania dla mieszaniny tworzywa z gazem i przyspieszyć proces dyfuzji gazowej, gdyż intensywne ścinanie tworzywa z gazem podczas przetwórstwa sprzyja wydzielaniu porów. Mała lepkość wtryski-



Rys. 4. Ilustracja procesu mikroporowania [21]

wanego w stanie nadkrytycznym gazu wywołuje w uplastycznionym tworzywie działanie zbliżone do działania plastyfikatora. Po zmieszaniu gaz i polimer tworzą jednofazowy roztwór o niskiej lepkości, dzięki czemu ruch ślimaka może odbywać się z mniejszym nakładem energii [22].

Objętość wtrysku stosowana przy wytwarzaniu mikroporowatych wyprasek jest zazwyczaj do 20% mniejsza niż w przypadku wtryskiwania wyprasek litych. Skutkuje to również krótszym czasem uplastyczniania i krótszą drogą powrotu ślimaka [22].

Większa prędkość wtrysku skutkuje większą redukcją masy wyprasek. Wyższe prędkości wtrysku wywołują większe chwilowe spadki ciśnienia w formie, a zatem umożliwiają otrzymywanie gęstej, porowatej struktury. Jeśli wtrysk następuje zbyt wolno, tworzywo gwałtownie schładza się w kanałach doprowadzających, przez co wymagane jest wyższe ciśnienie wtrysku, aby poprawnie wypełnić gniazdo. Generalnie, ciśnienie wtrysku w procesie mikroporowania może być 60% niższe niż w konwencjonalnej metodzie wtryskiwania [22]. Odmianą metody wtryskiwania mikroporującego jest też wtryskiwanie porujące dwuskładnikowe, metodą tą wytwarza się wypraski z litym naskórkim z jednego tworzywa oraz mikroporowatym rdzeniem z drugiego [2,23,24,25].

2. METODY WTRYSKIWANIA MIKROPORUJĄCEGO

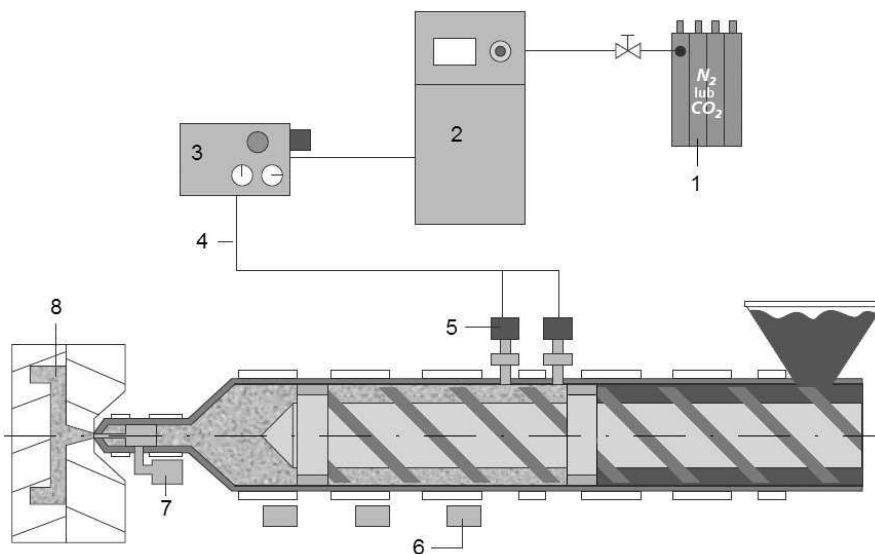
2.1. Metoda Mucell

W procesie wtryskiwania mikroporującego metodą MuCell do układu uplastyczniającego wtryskarki wprowadza się gaz w stanie nadkrytycznym (ang. SCF – supercritical fluid) w celu wytworzenia jednofazowego roz-

tworu gazu z ciekłym tworzywem, wtryskiwanego do gniazda formy [2,9,11,26,27]. Na skutek gwałtownego spadku ciśnienia w gnieździe, zachodzi proces nukleacji dużej liczby zarodków powodujących powstawanie struktury porowatej. Szybkość i efektywność rozrostu mikroporów jest zależna od warunków wtryskiwania, głównie od ciśnienia i temperatury tworzywa, jak i od rodzaju gazu, jego ilości, rozpuszczalności i zdolności do dyfuzji w tworzywie. Ostateczne uformowanie wypraski zachodzi w gnieździe formującym. Ponadto w procesie nie jest wymagane stosowanie ciśnienia docisku, gdyż jego rolę przejmuje ciśnienie gazu wewnątrz powiększających się porów. Pozwala to znacząco zredukować czas całego cyklu wtryskiwania. Większa ilość gazu rozpuszczonego w tworzywie powoduje powstawanie dużej liczby drobnych mikroporów.

W procesie wtryskiwania mikroporującego MuCell najczęściej stosowane są dwa rodzaje gazów: azot oraz dwutlenek węgla [2,9,11,12,14,15,27,28]. Azot osiąga stan nadkrytyczny przy temperaturze -147°C i ciśnieniu 3,4 MPa. Pozwala na uzyskanie gęstej struktury mikroporowatej, przy zachowaniu dobrej jakości powierzchni wyprasek i znacznej redukcji ich masy. Reakcja porowania z zastosowaniem azotu przebiega bardzo intensywnie. Dwutlenek węgla osiąga stan nadkrytyczny przy temperaturze $31,1^{\circ}\text{C}$ i ciśnieniu 7,22 MPa. Jest od 4 do 5 razy łatwiej rozpuszczalny w tworzywie niż azot. Stosowanie dwutlenku węgla pozwala na zmniejszenie lepkości wtryskiwanej mieszaniny, co ułatwia porowanie wyprasek o skomplikowanych kształtach. Ze względu na dobrą rozpuszczalność dwutlenku węgla w tworzywie i mało intensywną, wydłużoną nukleację, reakcja porowania zachodzi mniej intensywnie niż w przypadku azotu.

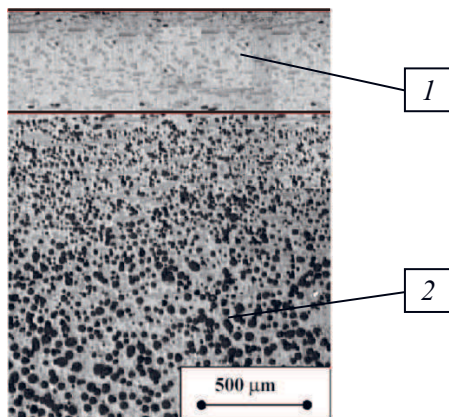
Doprowadzenie gazu do stanu nadkrytycznego ułatwia jego rozpuszczanie w tworzywie uplastycznionym.



Rys. 5. Schemat wtryskiwania mikroporującego MuCell: 1 – zbiornik gazu, 2 – układ dozowania gazu, 3 – moduł kontroli ciśnienia gazu, 4 – układ doprowadzania gazu w stanie nadkrytycznym, 5 – wtryskiwacze gazu, 6 – opaski grzejne, 7 – zawór odcinający, 8 – wypraska o strukturze mikroporowatej [28]

W tym stanie gaz zachowuje się jak ciecz, ma małą ściśliwość, co znacznie ułatwia jego dozowanie. Duża prędkość dyfuzji gazu w stanie nadkrytycznym do tworzywa sprzyja powstawaniu równomierne rozłożonych mikroporów.

Schemat procesu wtryskiwania porującego z doprowadzaniem gazu w stanie nadkrytycznym do układu uplastyczniającego wtryskarki przedstawiono na rysunku 5. Szybkie uzyskanie jednorodnego roztworu gazu i polimeru umożliwia znacznie większe niż w przypadku wtryskiwania konwencjonalnego przeciwcisnienie w układzie uplastyczniającym, wynoszące od 8 do 20 MPa ($0,3 \div 3$ MPa w przypadku wtryskiwania konwencjonalnego) [29]. Mikrostruktury charakterystyczne dla warstwy wierzchniej i rdzenia wypraski wytworzonej w procesie MuCell przedstawiono na rysunku 6, natomiast na rysunku 7 porównano strukturę wyprasek uzyskanych z polipropylenu w tym procesie z wypraskami z tworzywa zawierającego porofor chemiczny.

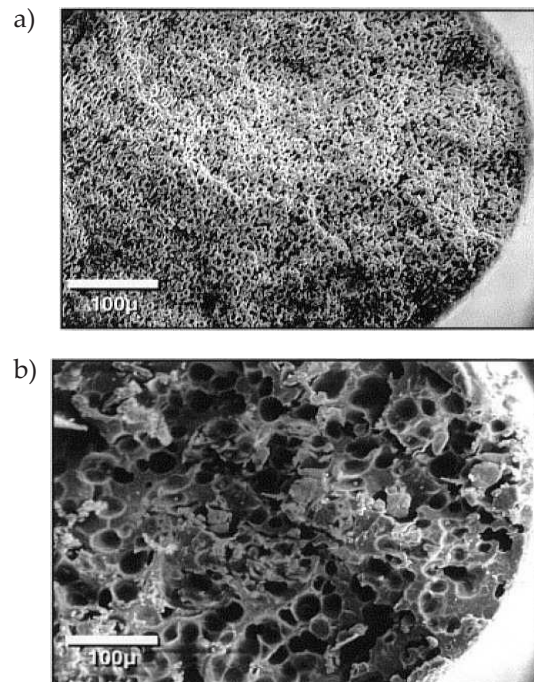


Rys. 6. Morfologia wypraski z PBT z włóknem szklanym wytworzonej w procesie MuCell: 1 – lita warstwa wierzchnia, 2 – porowaty rdzeń [12]

Wtryskarki stosowane w procesie wtryskiwania mikroporującego są wyposażone w ślimak z wydzieloną dodatkową strefą mieszająco-chłodzącą w miejscu doprowadzania gazu oraz układ wtryskiwaczy gazu w stanie nadkrytycznym. Zazwyczaj stosowane są ślimaki o współczynniku $L/D = 28$. Konieczne jest również zastosowanie odpowiedniego oprogramowania sterującego pracą wtryskarki [2].

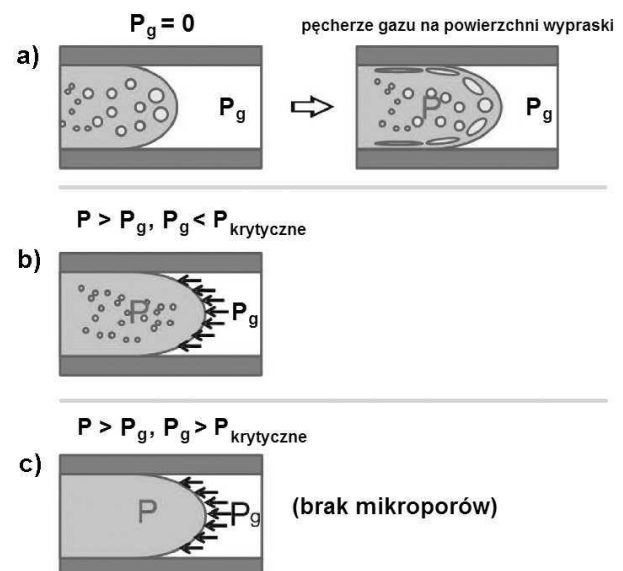
Mogą być stosowane typowe formy wtryskowe z zimnymi i gorącymi kanałami, jednak ze względu na krótki czas wtrysku i dużą prędkość wtryskiwania muszą być wyposażone w odpowiednie kanały odpowietrzające.

Celem polepszenia jakości powierzchni wyprasek (uzyskanie gładziej powierzchni), wtryskiwanie mikroporujące MuCell może być przeprowadzane z wykorzystaniem przeciwcisnienia gazu w gnieździe formującym [2,17,30]. Na rysunku 8 porównano przebieg mikroporowania bez oraz z przeciwcisnieniem. Przy zastosowaniu przeciwcisnienia unika się tworzenia pęcherzy gazowych

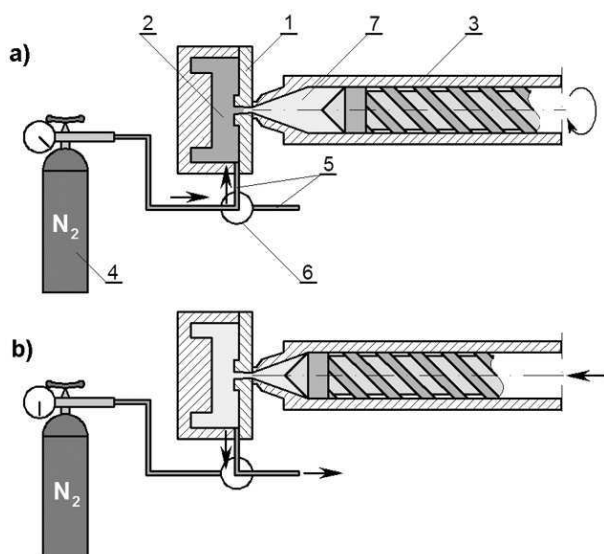


Rys. 7. Porównanie morfologii wyprasek z polipropylenu uzyskanych przy zastosowaniu metody MuCell (a) i poroforu chemicznego (b) [12]

w warstwie przypowierzchniowej wypraski, przy czym jej struktura zależy od wartości przeciwcisnienia. Zbyt duża jego wartość może uniemożliwić uzyskanie struktury mikroporowatej. Na rysunku 9 przedstawiono schemat wtryskiwania mikroporującego z przeciwcisnieniem.



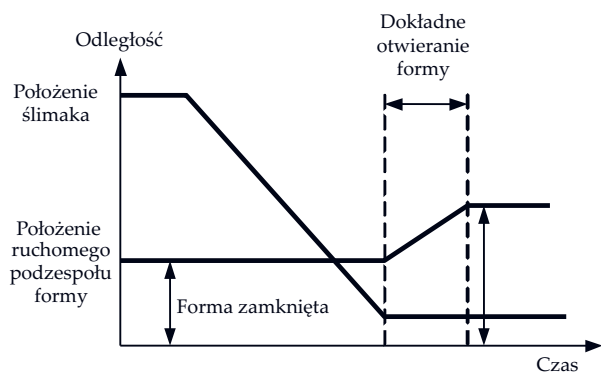
Rys. 8. Przebieg mikroporowania w procesie MuCell bez przeciwcisnienia w gnieździe formującym (a) oraz z przeciwcisnieniem (b, c); P – ciśnienie tworzywa z gazem porującym, $P_{krytyczne}$ – minimalne ciśnienie tworzywa z gazem porującym, P_g – przeciwcisnienie w gnieździe formującym [31]



Rys. 9. Schemat procesu wtryskiwania mikroporującego z zastosowaniem przeciwcisnienia w gnieździe formującym: a) wypełnianie gniazda formującego gazem obojętnym, b) wtryskiwanie tworzywa z gazem porującym; 1 – forma wtryskowa, 2 – gniazdo formujące, 3 – układ uplastyczniający wtryskarki, 4 – zbiornik z gazem obojętnym (azotem), 5 – kanały doprowadzające i odprowadzające gaz obojętny, 6 – zawór sterujący, 7 – tworzywo wtryskiwane [2]

Przed fazą wtrysku tworzywa zostaje wytworzone przeciwcisnienie gazu obojętnego w gnieździe formującym (Rys. 9a). Po wypełnieniu gniazda tworzywem z gazem porującym, gaz obojętny jest odprowadzany przez specjalne kanały (Rys. 9b).

Ponadto po zakończeniu fazy wtrysku proces porowania może się odbywać z częściowym otwarciem formy w celu powiększenia objętości gniazda formującego na etapie powstawania struktury mikroporowatej (Rys. 10). Gniazdo formujące jest częściowo wypełnione tworzywem z gazem porującym, po czym następuje niewielkie otwarcie formy. Rozrost struktury porowatej następuje po zmniejszeniu ciśnienia tworzywa w gnieździe, na skutek zwiększenia objętości gniazda.

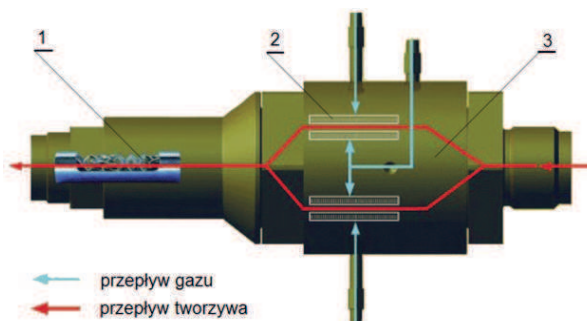


Rys. 10. Wtryskiwanie Mucell: wykres zależności położenia ruchomego podzespołu formy wtryskowej i ślimaka w funkcji czasu [2,30]

W obu wymienionych metodach wtryskiwania najpierw następuje zestalenie litej warstwy wierzchniej wypraski, a następnie zachodzi proces mikroporowania.

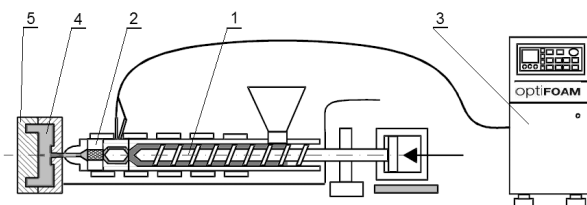
2.2. Metoda Optifoam

Metoda wtryskiwania mikroporującego Optifoam umożliwia wytwarzanie wyprasek o strukturze mikroporowatej przy użyciu wtryskarek konwencjonalnych. Analogicznie jak w przypadku wtryskiwania konwencjonalnego tworzyw litych, uplastycznianie tworzywa odbywa się w układzie uplastyczniającym wtryskarki. Doprowadzenie gazu mikroporującego (najczęściej dwutlenku węgla) [32,33] do ciekłego tworzywa odbywa się w specjalnej dyszy (rys. 11), instalowanej pomiędzy układem uplastyczniającym a formą wtryskową.



Rys. 11. Dysza firmy Sulzer do wtryskiwania mikroporującego metodą Optifoam: 1 – mieszalnik statyczny, 2 – tuleja porowata, 3 – torpeda [2,19,20]

Doprowadzany do dyszy gaz przedostaje się do porowatej tulei, umożliwiającej wprowadzenie go do ciekłego tworzywa w wielu miejscach jednocześnie. Ułatwia to rozpuszczenie odpowiedniej ilości gazu w tworzywie w krótkim czasie. Homogenizację jednorodnej mieszaniny tworzywa z gazem ułatwia ponadto zastosowanie mieszalnika statycznego. Schemat typowej linii technologicznej do wtryskiwania mikroporującego Optifoam przedstawiono na rys. 12.

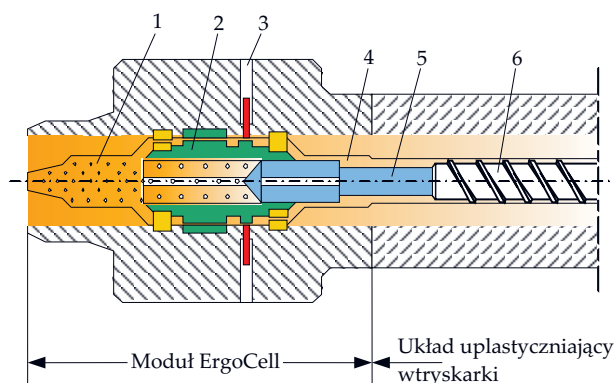


Rys. 12. Przykład linii technologicznej do wtryskiwania mikroporującego metodą Optifoam: 1 – konwencjonalny układ uplastyczniający wtryskarki, 2 – dysza do wtryskiwania mikroporującego, 3 – układ doprowadzania gazu, 4 – wypraska mikroporowata, 5 – forma wtryskowa [2,20]

Zaletą metody Optifoam jest brak konieczności modyfikacji układu uplastyczniającego wtryskarki oraz łatwe kontrolowanie ciśnienia w dyszy wtryskowej, pozwalające na dozowanie odpowiedniej ilości gazu. Ograniczeniem tej metody jest wysokie ciśnienie występujące w dyszy podczas fazy wtrysku tworzywa do formy, ograniczające doprowadzanie gazu do dyszy wtryskowej.

2.3. Metoda ErgoCell

Podobnie jak w przypadku metody Optifoam, w metodzie ErgoCell wykorzystuje się oddzielną dyszę umieszczoną na końcu układu uplastyczniającego wtryskarki konwencjonalnej. Gaz (najczęściej dwutlenek węgla) jest doprowadzany bezpośrednio do dyszy, gdzie zostaje zmieszany z ciekłym tworzywem [18]. Dysza (rys. 13)



Rys. 13. Schemat procesu mikroporowania ErgoCell firmy Demag Ergotech: 1 – jednofazowy roztwór tworzywa ciekłego z gazem, 2 – mieszalnik, 3 – dysza wtrysku gazu, 4 – tworzywo ciekłe, 5 – tłok wtryskowy, 6 – ślimak [2,18]

składa się z mieszalnika oraz elementu zamykającego, zintegrowanego z układem doprowadzania gazu i sterownikiem wtryskarki. W fazie pobierania tworzywa przez ślimak wtryskarki, stapiania i transportowania go

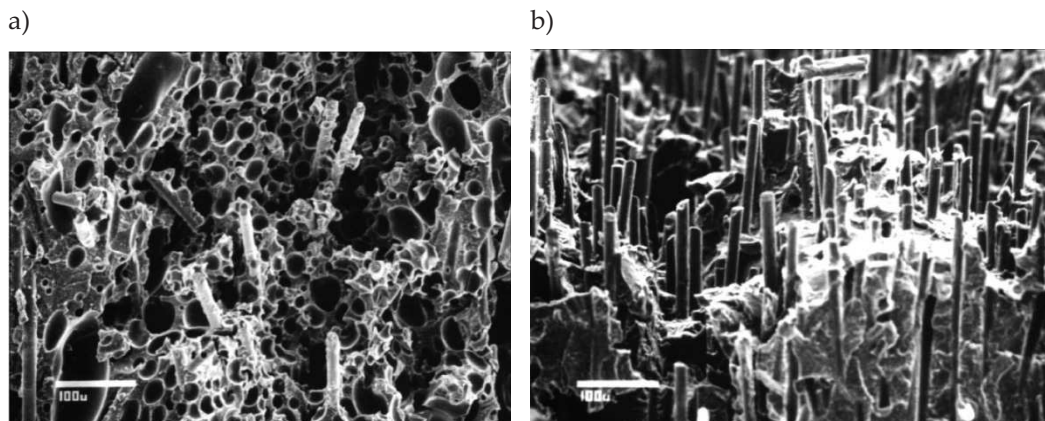
przed czoło ślimaka, do tworzywa w głowicy jest wprowadzana odpowiednia ilość gazu. Mieszanka ciekłego tworzywa z gazem ulega homogenizacji równocześnie, lecz niezależnie od procesu uplastyczniania tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki.

3. TWORZYWA WYKORZYSTYWANE W PROCESIE WTRYSKIWANIA MIKROPORUJĄCEGO, ZALETY I WADY PROCESU, ZASTOSOWANIA

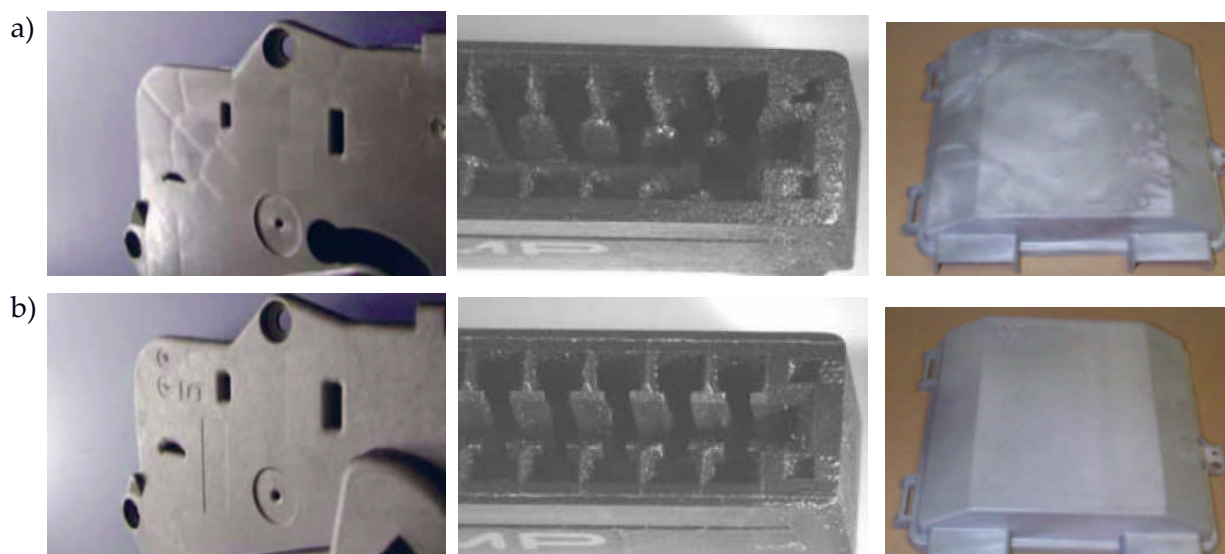
Większość tworzyw termoplastycznych, zarówno amorficznych jak i krystalicznych, może być przetwarzane metodą wtryskiwania mikroporującego (PP, PE, PS, PA, PC, POM, PC/ABS, PEI, PBT). Strukturę mikroporową można uzyskać w tworzywach napełnionych, nie napełnionych oraz elastomerach termoplastycznych. Strukturę mikroporową otrzymuje się również w wypraskach z tworzyw biodegradowalnych [2,34] i nanokompozytów (poliamid 6 z nanokaolinem) [2,35,36].

Ograniczeniem dla jakości uzyskiwanej struktury mikroporowej jest też w pewnej mierze struktura cząsteczkowa polimeru. Procesom krystalizacji w fazie zestalania się tworzywa może towarzyszyć wydzielanie się gazów w pobliżu krystalitów, stąd też struktura mikroporowa wyprasek z tworzyw częściowo krystalicznych może być nierównomierna. Wykazano że lepszą strukturą mikroporową uzyskuje się w wypraskach z tworzyw amorficznych niż krystalicznych, których morfologia jest też w dużym stopniu ostatecznie zależna od temperatury formy i szybkości chłodzenia [37].

Jednym z najczęściej stosowanym w metodzie mikroporowania tworzywem termoplastycznym jest blendy PC/ABS. Tworzywo to doskonale nadaje się do stosowania w tej metodzie przetwórstwa, gdyż jego amorficzna struktura dobrze sprzyja heterogenicznej nukleacji zarodków porów. Stosowanie napełniaczy, a w szczególności włókien szklanych pozwala na uzyskiwanie korzystnej jakościowo struktury porowatej. Wadą stosowania napełniaczy włóknistych jest dezorientacja włókien napełniacza wokół porów (Rys 14), w porównaniu do orientacji włókien w tworzywach litych [37].



Rys. 14. Morfologia SEM wyprasek z PBT z 20% zawartością napełniaczem w postaci włókien szklanych: (a) rdzeń wypraski mikroporowej, widoczna znaczna dezorientacja włókien, (b) wypraska lita z silną orientacją włókien w kierunku przepływu w formie [37]



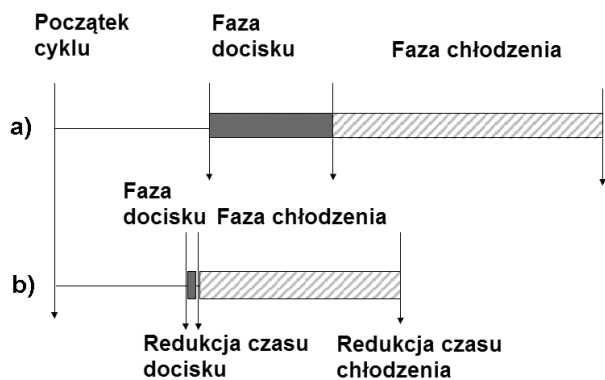
Rys. 15. Wypraski wytworzone z tworzywa litego (a) i tworzywa mikroporowatego (b); widoczne niedolewy i zapadnięcia na powierzchni wypraski litej [40]

Wypraski uzyskane metodą wtryskiwania mikroporującego posiadają szereg zalet [2,10,27,38,39]:

- ciężar wyprasek mikroporowatych może być o 95% mniejszy aniżeli wyprasek litych,
- mogą mieć ścianki o małej grubości, nawet od 0,3 mm,
- mają właściwości nieznacznie różniące się od właściwości wyprasek litych z tego samego tworzywa, np. przy ciężarze wypraski mikroporowatej mniejszym o 25% od wypraski litej występuje zmniejszenie sztywności tylko o około 7%,
- są pozbawione zapadnięć, odkształceń, mają zredukowany skurcz przetwórczy (Rys. 15).

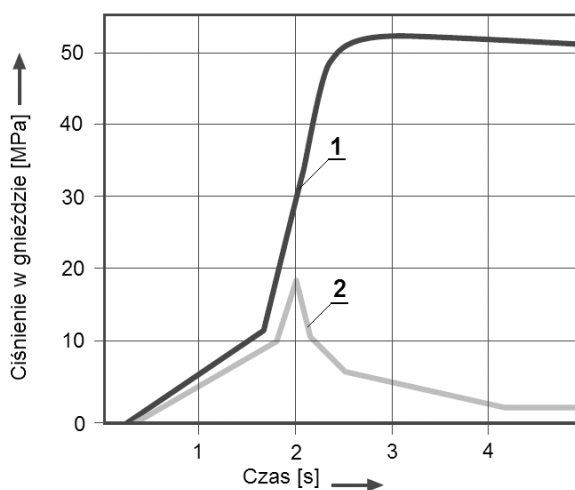
Do zalet procesu mikroporowania zaliczyć można:

- zmniejszenie lepkości tworzywa uplastycznionego przez wprowadzenie gazu w stanie nadkrytycznym, a w rezultacie znaczne obniżenie temperatury wtryskiwania (do 78%), ciśnienia wtryskiwania (od 30 do 50%) oraz siły zamykania formy (do 60%) [2,11,38].
- krótki czas cyklu wtryskiwania ze względu na niższą temperaturę tworzywa, łatwe wypełnianie gniazda

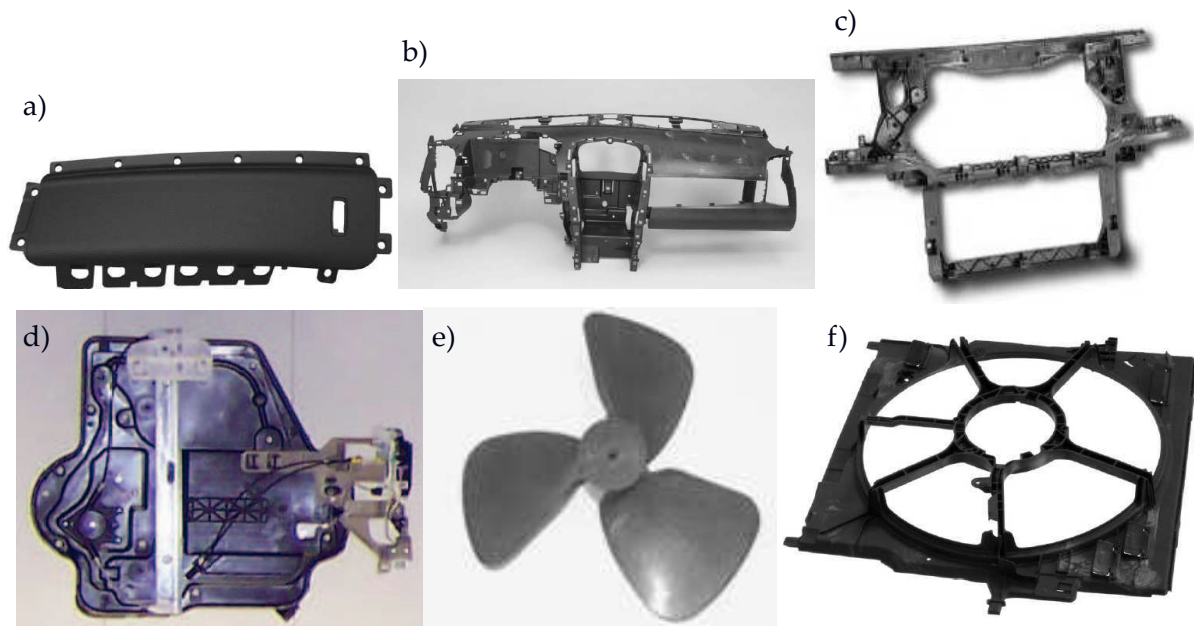


Rys. 16. Porównanie cyklu wtryskiwania konwencjonalnego (a) i mikroporującego (b) [21,42]

formującego przez tworzywo o małej lepkości oraz endotermiczną reakcję nukleacji i rozrostu porów przyspieszającą ochładzanie wypraski. Ponadto wyeliminowana zostaje faza docisku. Ciśnienie docisku zostaje zastąpione ciśnieniem gazu porującego w tworzywie dzięki czemu możliwe jest przeprowadzanie procesu przy małej sile zamykania formy. Pozwala to na stosowanie uproszczonej budowy układu zamykająco-otwierającego, co korzystnie wpływa na koszty wytwarzania wyprasek. Porównanie cyklu wtryskiwania konwencjonalnego i mikroporującego przedstawiono na rysunku 16, natomiast na rysunku 17 pokazano rozkład ciśnienia tworzywa w gnieździe formującym w funkcji czasu cyklu wtryskiwania konwencjonalnego i mikroporującego [41].



Rys. 17. Porównanie rozkładu ciśnienia tworzywa w gnieździe formującym w funkcji czasu cyklu wtryskiwania konwencjonalnego (1) i mikroporującego (2) [41]



Rys. 18. Przykłady wyprasek wytworzonych metodą wtryskiwania mikroporującego stosowanych w przemyśle samochodowym: a) poszycie poduszki powietrznej, b) obudowa deski rozdzielczej, c) elementy deski rozdzielczej d) element drzwi, e) wentylator, f) obudowa wentylatora [15]

- możliwość łatwego rozprowadzania napełniaczy w tworzywie, np. długich włókien szklanych.
- siła zamykania formy może być nawet o 40 do 60% niższa niż w konwencjonalnym procesie wtryskiwania.

Do wad procesu mikroporowania zalicza się:

- wyższy o 10 ÷ 15% koszt wtryskarki,
- widoczne wady powierzchni w postaci zawirowań tworzywa na powierzchni wyprasek,
- matową powierzchnię wyprasek mikroporowatych,
- konieczność poddawania uzyskanych wyprasek procesowi stabilizacji, w którym gaz opuszcza mikropory i następuje wyrównanie ciśnienia wewnątrz porów z ciśnieniem atmosferycznym.

Metodą wtryskiwania mikroporującego wytwarzane są obudowy, elementy pojazdów, skrzynki bezpieczników, sprzęt sportowy, elementy sprzętu medycznego, uszczelnienia przewodów rurowych rozgałęzionych, opaski zaciskowe. Wtryskiwanie mikroporujące może być wykorzystane w procesie dekorowania i laminowania w formie wtryskowej. Przykłady wyprasek wytwarzanych metodą MuCell, mających zastosowanie w przemyśle samochodowym przedstawiono na rysunku 18.

4. PODSUMOWANIE

Wytwarzanie wyprasek mikroporowatych z tworzyw termoplastycznych jest zagadnieniem złożonym, zależnym od wielu czynników zarówno technologicznych, takich jak odpowiednie ustawienie parametrów wtryskiwania, jak i ekonomicznych, m. in. oszczędności tworzywa i skrócenia czasu cyklu, przy jednoczesnym zwiększeniu nakładów na doposażenie wtryskarki. Dużą korzyścią z zastosowania tej metody jest możliwość uzyskiwa-

nia mikroporowatych wyprasek cienkościennych, bez znacznego pogorszenia ich właściwości mechanicznych, co stwarza znaczne problemy technologiczne przy zastosowaniu poroformów chemicznych. Projektowanie procesu wtryskiwania mikroporującego może być wspomagane poprzez stosowanie programów symulacyjnych, wykorzystujących metodę elementów skończonych (np. program Moldflow z modułem „Microcellular Injection Moulding” oraz program Moldex3D) [43].

Wtryskiwanie mikroporujące jest stosunkowo nową odmianą metody wtryskiwania, jej zastosowanie na skale przemysłową niesie duży potencjał poprzez poszerzenie zakresu stosowania tworzyw polimerowych o specyficznych właściwościach.

Bibliografia

1. Bieliński M., Techniki porowania tworzyw termoplastycznych. Wyd. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004.
2. Bociąga E., Specjalne metody wtryskiwania tworzyw sztucznych. WNT, Warszawa 2008.
3. Eaves D., Handbook of Polymer Foams. Rapra Technology Limited, U.K., Shawbury 2004, 32.
4. Harper C. A., Modern Plastics Handbook. McGraw-Hill Professional Publishing, U.S.A., Ohio 2000, 263.
5. Hydrocerol, Chemical Foaming and Nucleating Agents. Materiały informacyjne firmy Clariant, Clariant Corporation, U.S.A. 2007.
6. Michalska M., Czym spieniać? Chemiczne i fizyczne środki spieniające. Rynek Tworzyw 2/2000.
7. Throne J. L., Thermoplastic Foam Extrusion: an Introduction. Carl Hanser Verlag, Munich 2004, 13.
8. Garbacz, T., Tor A., Polimery-W 2007, 52, 286.

9. Bociąga E., Wtryskiwanie mikroporujące (MuCell). Praca zbiorowa pt. Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych, (red. Koszkuł J., Bociąga E.), CWA Regina Poloniae, Częstochowa 2006, 36.
10. Bravo V.L., Hrymak A.N., *Int Polym Proc* 2005, **2**, 149.
11. Osswald T. A., Turng L.S., Gramann P.J., *Injection Molding Handbook*. Hanser Publisher, Munich, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati 2001.
12. Hörr M., Schönherr O., Wykorzystanie zalet ekonomicznych technologii MuCell. Materiały techniczne firmy Ticona Kelsterbach.
13. Hwang S.S., Chen S.Ch., Chung M.H., Study on the Mechanical Properties of Microcellular Injection Molded Parts, ANTEC 2005, 776.
14. Hyde L. J., Kishbaugh L. A., The MuCell Injection Molding Process: A Strategic Cost Savings Technology for Electronic Connectors. Materiały International Institute of Connector and Interconnection Technology, Inc. (IICIT) Annual Symposium, Trexel, Inc. 2003.
15. MuCell Process, www.trexel.com (10.07.2013).
16. Xu J., *Microcellular Injection Molding*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey 2011.
17. Błędzki A.K., Faruk O., Kirschling H., Klihn J., Jaszkiwicz A., *Polimery-W* 2006, **51**, 697.
18. Ergocell. Combining Stability with Lightness. www.dpg.com (10.07.2013).
19. Plastic Processing. Optifoam, www.sulzerchemtech.com (10.07.2013).
20. Optifoam; Foam injection moulding at Pollmann. Prezentacja techniczna firmy Pollmann.
21. Guanghong H., Yu W., Microcellular Foam Injection Molding Process, Some Critical Issues for Injection Molding, DOI: 10.5772/34513.
22. Xu J., Pierick D., Microcellular Foam Processing in Reciprocating, www.trexel.com/techpp/recscrew.pdf (10.07.2013).
23. Shen C., Kramschuster A., Ermer D., Turng L.S., *Int Polym Proc* 2006, **4**, 393.
24. Turng L.S., Kharbas H., A Novel Microcellular Co-injection Molding Process. ANTEC 2004, 535.
25. Turng L.S., Kharbas H., *Int Polym Proc* 2004, **1**, 77.
26. 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, 708.
27. Steinbichler G., Nowa technologia spieniania drobnokomórkowego wyprasek – Mu-Cell. W: Technologie wtryskiwania, jakość i efektywność. Wyd. Plastech, Warszawa 2000, 141.
28. Machines for Microcellular Moulding MuCell Processes. Prezentacja techniczna firmy Krauss-Maffei, www.plastics-bavaria.ro (10.07.2013).
29. Kramschuster A., Cavitt R., Ermer D., Chen Z., Turng L.S., Quantitative Study of Shrinkage and Warpage Behavior for Microcellular and Conventional Injection Molding. The Polymer Processing Society Twenty First Annual Meeting, Leipzig 2005, SL2-20.
30. Błędzki A.K., Kirschling H., Klihn J., *Mechanika* 2006, **z. 6-M**, 47.
31. Shia-Chung Ch., *Soc Plast E* 2009, 10.1002/spepro.000055.
32. Goodship V., Ogur E., *Polymer Processing with Supercritical Fluids*. Rapra Technology Limited, U.K., Shawbury 2004.
33. Cinpres Gas Injection, www.cinpres.net/index.php/cinpres-technologies/optifoam (10.07.2013).
34. Matuana L.M., Mohanty A.K., Misra M., Batch Process Microcellular Foaming of Poly(lactic) Acid. The Polymer Processing Society Twentieth Annual Meeting, Ohio 2004, 125.
35. Chandra A., Gong S., Turng L.S., Gramann P., Cell Development in Microcellular Injection Molded Polyamide-6 Nanocomposite and Neat Resin. ANTEC 2004, 540.
36. Chandra A., Gong S., Yuan M., Turng L.S., *Polym Eng Sci* 2005, **45**, 52.
37. Xu J., *SOC PLAST E*, 2009, 10.1002/spepro.000059.
38. Engel Foammelt. Engel MuCell Microcellular Injection Molding. www.eurotecsls.com/engel_mucell.htm (10.07.2013).
39. Gong S., Yuan M., Chandra A., Kharbas H., Osorio A., Turng L.S., *Int Polym Proc* 2005, **2**, 202.
40. A Guide to the Mucell Microcellular Foam Injection Molding Process: Fundamentals, Set-up, Optimization & Troubleshooting. Biuletyn techniczny firmy Trexel Inc.
41. Engel Foammelt. Light Parts for Heavy Duty. www.trexel.com/AnwendTechnik2005.pdf (10.07.2013).
42. Fischer M., Foammelt – Mucell. Biuletyn techniczny firmy Engel TB-E75-e-10/2000.
43. Moldex3D Launches Novel Simulation of MuCell® Process Technology in R11: www.moldex3d.com/en/newsletter/mucell-process-technology-in-r11 (10.07.2013).