

KAROL PEPLIŃSKI<sup>\*)</sup>, MAREK BIELIŃSKI

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Techniki Tworzyw  
ul. Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 87-796 Bydgoszcz

## Właściwości przetwórcze i użytkowe pojemników wytwarzanych w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniami w zmiennych warunkach przetwórstwa — ocena wydajności i jakości procesu<sup>\*\*)</sup>

**Streszczenie** — Scharakteryzowano proces przetwórczy polegający na wytłaczaniu z rozdmuchiwaniami nieswobodnym (w formie). Metodą tą wytwarzano pojemniki z bimodalnego PE-HD stosując rozmaite warunki przetwórstwa, tj. zmienną temperaturę ( $T_m$ ) i grubość ( $g_w$ ) węża wytłaczanego tworzywa oraz ciśnienie rozdmuchiwania ( $p_b$ ). Oceny właściwości użytkowych uzyskanych wytworów a także jakości i wydajności procesu dokonano na podstawie wyznaczonego skurczu przetwórczego pojemnika, jego właściwości mechanicznych jak również miary odwzorowania powierzchni ścianki gniazda formy (chropowatości). Jako wyznacznik tej oceny zaproponowano zestaw odpowiednich wskaźników; ilościowe zależności wybranych wskaźników od ww. warunków przetwórstwa przedstawiono w postaci równań.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie z rozdmuchiwaniami, warunki przetwórstwa, skurcz przetwórczy, parametr chropowatości, pojemniki, właściwości mechaniczne, wydajność i jakość procesu, wskaźniki oceny.

### PROCESSING AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF THE CONTAINERS PREPARED BY BLOWING EXTRUSION IN VARIABLE PROCESSING CONDITIONS, AND EVALUATION OF YIELD AND QUALITY OF THE PROCESS

**Summary** — The process of blowing extrusion has been characterized (Fig. 1, 2, 4, 9). The containers made of bimodal PE-HD were prepared in this way at variable processing conditions *i.e.* variable temperature ( $T_m$ ), polymer parison thickness ( $g_w$ ) and different blowing pressure ( $p_b$ ). Functional properties of the products obtained as well as the quality and yield of the process were evaluated on the basis of processing shrinkage (Fig. 3, 8), mechanical properties of the products (Fig. 5) and on the measure of mapping of mold cavity wall surface (surface roughness) (Fig. 6, 7). The set of the proper indices has been proposed as a measure of this evaluation. Qualitative dependence of selected indices on the processing conditions is given in equations (Table 1).

**Key words:** blowing extrusion, processing conditions, processing shrinkage, roughness parameter containers, mechanical properties, process yield and quality, evaluation indices.

Wytłaczanie, obok wtryskiwania, stanowi podstawową metodę przetwórstwa tworzyw polimerowych, wciąż będącą przedmiotem intensywnych prac badawczych (por. [1–4]). Jednym z interesujących wariantów wytłaczania jest proces wytłaczania z rozdmuchiwaniami. Pierwsze wzmianki dotyczące tego wariantu pochodzą z końca XIX w., kiedy to rozdmuchiwano syntetyczny celulozoid, wykonując z niego m.in. dziecięce grzechotki, piłki pingpongowe, części lalek, rączki sztućców [5]. Szybki rozwój maszyn przetwórczych i technologii

wytwarzania tworzyw wielkocząsteczkowych pod koniec lat 30 XX w. przyczynił się do użycia polietylenu (PE) jako materiału do produkcji wytworów rozdmuchiwanych [6–8]. Wykorzystanie odmiany polietylenu dużej gęstości (PE-HD) na większą skalę w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniami nastąpiło dopiero po roku 1956 [5].

Intensywny wzrost zastosowania opakowań z tworzyw polimerowych, np. do napojów, kosmetyków, produktów chemicznych, środków czystości i farmaceutyków [8] wiąże się z jednej strony z zastępowaniem dotychczas używanych: metalu, papieru i szkła, a z drugiej — z kreowaniem nowych kierunków wykorzystywania, np. polimerowych materiałów wielowarstwowych (barierowych). W roku 2006 w Europie Zachodniej prze-

<sup>\*)</sup> e-mail: karolpep@utp.edu.pl

<sup>\*\*)</sup> Artykuł zawiera treść wystąpienia prezentowanego na XIII Profesorskich Warsztatach Naukowych „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Lublin, 8–11 czerwca 2008 r.

tworzono 49,5 mln ton tworzyw wielkokształczkowych, w tym aż 37 % w produkcji opakowań [9]. Ten dynamiczny rozwój uzasadnia twierdzenie, że techniki wytwarzania opakowań, zwłaszcza proces wytłaczania z rozdmuchiowaniem, stanowią ważny kierunek rozwoju przetwórstwa tworzyw.

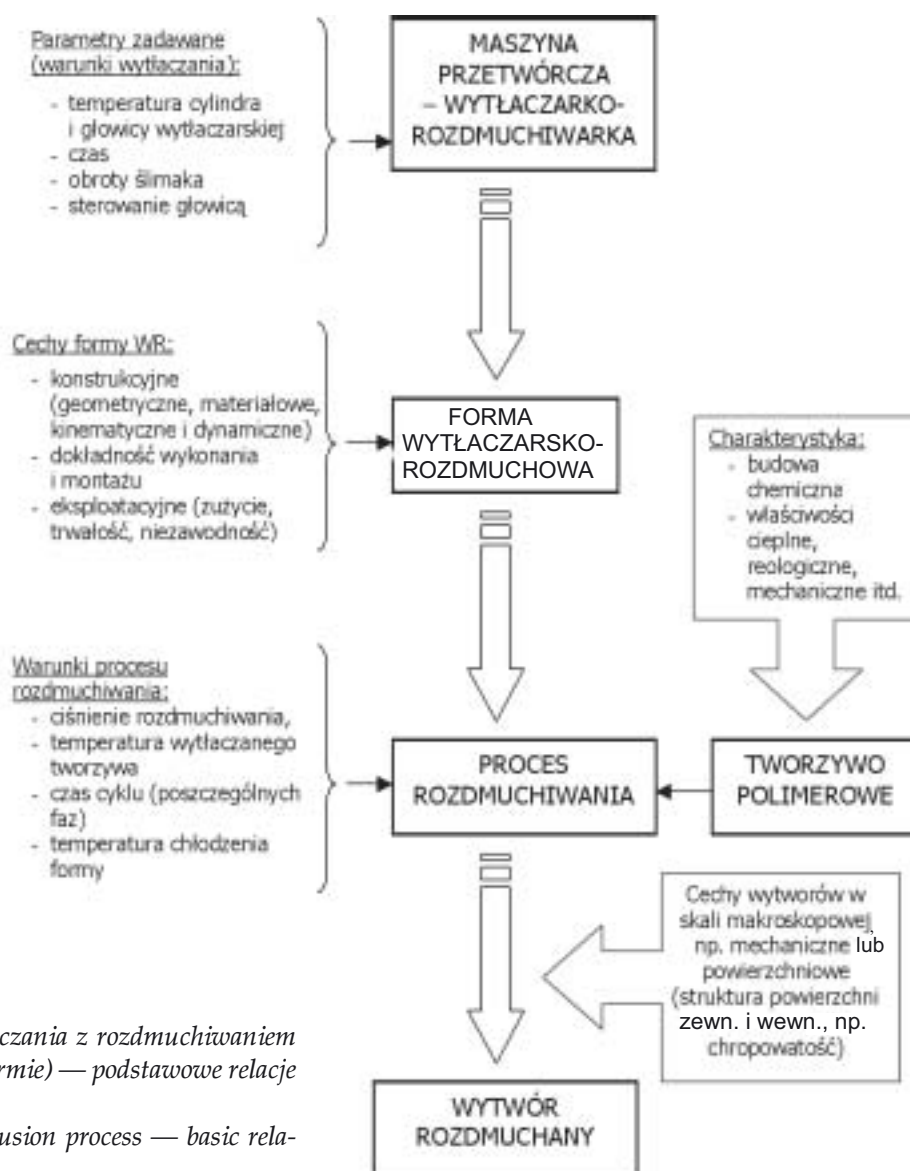
#### CHARAKTERYSTYKA WYTŁACZANIA Z ROZDMUCHIWANIEM NIESWOBODNYM

Proces ten polega na wytłaczaniu uplastycznionego węża grubościennego i następnym mechanicznym ograniczeniu rozciągania na drodze rozdmuchiwania jego odcinka zamkniętego w formie wytłaczarsko-rozdmuchowej (formie WR) [10–13]. W ten sposób otrzymuje się przede wszystkim średnich wymiarów pojemniki z tworzyw termoplastycznych do napojów, leków, środków chemicznych i kosmetyków [8, 14] a także o większych rozmiarach, np. zbiorniki na paliwa płynne [15, 16] lub beczki, bądź też puste wytwory cienkościennie,

zwane niekiedy wydmuszkami, np. zabawki lub elementy konstrukcyjne [8].

Charakteryzując proces wytłaczania z rozdmuchiowaniem należy uwzględnić rodzaj przetwarzanego tworzywa, maszyny przetwórczej (wytłaczarko-rozdmucharki), głowicy wytłaczającej, formy wytłaczarsko-rozdmuchowej a także rozdmuchiwanego wytworu oraz wzajemne ich relacje [13]. Na podstawie literatury [17, 18–32], jak również tradycji związanej z nomenklaturą przetwórczą, w dalszym tekście zastosowano określone nazewnictwo elementów układu roboczego w procesie wytłaczania z rozdmuchiowaniem w formie (rys. 1).

Konstrukcja oraz technologia wykonania i montażu formy WR mają decydujący wpływ na uzyskiwanie wytworów o zamierzonym kształcie i wymiarach, wymaganej jakości powierzchni oraz korzystnych właściwościach użytkowych [22, 28–30]. Dokładność wymiarów wytworów rozdmuchiowanych zależy, przede wszystkim, od precyzji wykonania, działania a także stopnia zużycia elementów współpracujących zarówno formy,



Rys. 1. Proces wytłaczania z rozdmuchiowaniem nieswobodnym (w formie) — podstawowe relacje i definicje

Fig. 1. Blowing extrusion process — basic relations and definitions

jak i maszyny wytłaczająco-rozdmuchującej, w której ta forma jest zainstalowana [19]. W obliczeniach wymiarów nominalnych gniazda formującego należy uwzględnić skurcz przetwórczy tworzywa. Wartość tego skurczu określa się w sposób przybliżony, na przykład na podstawie danych producenta [12, 17].

Oceny cech przetwórczych i użytkowych wytworów wytłaczanych z rozdmuchiwaniami nieswobodnym można dokonać na podstawie badań wskaźników mechanicznych [20] (np. rozciągania statycznego i udarowego), geometrycznych (np. skurczu przetwórczego, chropowatości powierzchni, miary odwzorowania geometrycznego powierzchni gniazda formującego) a także pomiaru rozkładu pola temperatury pojemnika rozdmuchanego [31]. Ważne jest więc szersze poznanie wpływu warunków wytłaczania z rozdmuchiwaniami (zwłaszcza temperatury wytłaczanego węża  $T_m$ , grubości tego węża  $g_w$  i jej rozkładu oraz ciśnienia rozdmuchiwania  $p_b$ ) na właściwości uzyskiwanych opakowań wiążące się ze spełnianiem ich funkcji użytkowych ochronnych i marketingowych.

Celem opisaną w dalszym tekście pracy było określenie wpływu parametrów technologicznych ( $T_m$  oraz  $p_b$ ) a także chropowatości powierzchni gniazda formy ( $R_{af}$ ) oraz wartości  $g_w$  na zmienność wybranych właściwości wytworów (pojemników) uzyskiwanych metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniami. Wyniki te posłużyły do wyznaczenia wskaźników określających jakość i wydajność procesu.

## CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

Do wytłaczania z rozdmuchiwaniami pojemników stosowano bimodalny polietylen PE-HD (BS2541, firmy Borealis [32]).

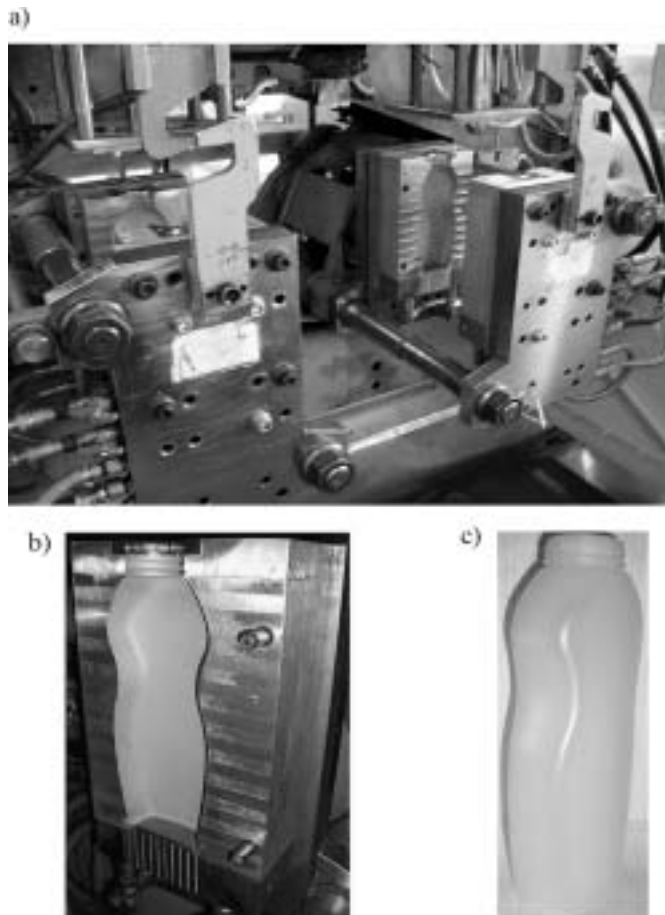
### Stanowisko badawcze

Próby technologiczne wytłaczania z rozdmuchiwaniami realizowano w linii technologicznej firmy Bekun H111 ( $L = 1209$  mm,  $D = 38$  mm) przy użyciu formy wytłaczarsko-rozdmuchowej jednogniazdowej HP5035 (firmy Heinz Plastic Polska — HPP) (rys. 2).

### Warunki wytłaczania

Wytłaczanie z rozdmuchiwaniami realizowano w następujących warunkach dobranych i ustalonych w linii technologicznej: temperatura stref grzejnych układu uplastyczniającego 185, 185, 210, 190 °C, temperatura na przejściu cylinder-głowica kątowna 220 °C, temperatura w poszczególnych strefach głowicy 210, 215, 180, 190 °C.

Przyjęto, że temperatura wytłaczanego węża ( $T_m$ ) jest równa temperaturze w ostatniej części głowicy. Zmienne



Rys. 2. a) Układ narzędziowy z dwiema formami wytłaczarsko-rozdmuchowymi stosowany w badaniach, b) symetryczne gniazdo formy, c) wytwór rzeczywisty pojemności 750 ml (obiekt badań)

Fig. 2. a) Tool system with two blowing extrusion molds applied in the tests, b) symmetrical cavity mold, c) real product, capacity of 750 ml (object of examination)

wejściowe to ( $T_m$ ): 175, 190, 210 °C, ciśnienie rozdmuchiwania ( $p_b$ ): 0,35, 0,69, 0,9, 1,32 MPa, grubość wytłaczanego węża ( $g_w$ ): 1,2, 1,77, 2,65 mm.

Obroty ślimaka wynosiły 70 s<sup>-1</sup>, temperatura wody chłodzącej formę wytłaczarsko-rozdmuchową 16 °C, wartość  $R_{af} = 2,24$  μm.

### Metody badań wytworu

— Temperaturę wybranych obszarów pojemnika mierzono termometrem bezdotykowym IR Thermometr typ 8889 (HPP, Działdowo).

— Skurcz przetwórczy oceniano stosując urządzenie Contura<sup>®</sup> G2 RDS wraz z głowicą skanującą (Akson Bydgoszcz, rys. 3) wg PN-EN ISO 294-4:2003.

— Wytrzymałości na rozciąganie statyczne ( $\sigma_m$ ) i udarowe ( $u$ ) a także wydłużenie ( $\epsilon$ ) oraz moduł sprężystości ( $E$ ) mierzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron 4401 i PSd 50/15 wg PN-EN ISO 527-1, PN-EN ISO 527-3 oraz PN-ISO 8256+AC:1994.



Rys. 3. Urządzenie Contura® G2 RDS do wyznaczania skurczu i odkształceń  
Fig. 3. Contura® G2 RDS unit for determination of shrinkage and deformations

— Parametry chropowatości powierzchni ścianki pojemnika określano przy użyciu profilografometru Hommel Tester typ T2000 wg PN-EN ISO 4287:1999.

## WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

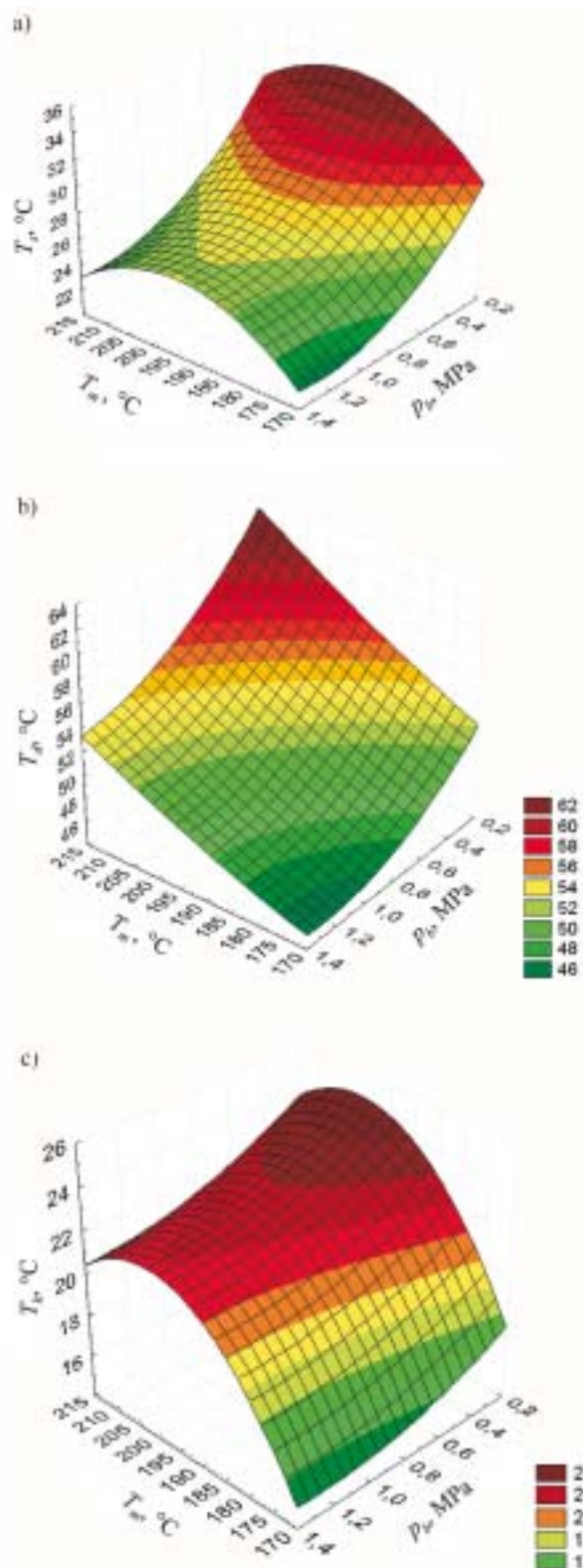
### Rezultaty badań doświadczalnych

Wyniki interpretowano wykorzystując jakościowy model matematyczny opisany szczegółowo w publikacjach [33—35].

Rozkład temperatury ścianki wytwarzanego pojemnika ( $T_p$ ) wskazuje na istotny wpływ temperatury wytłoczonego węża ( $T_m$ ) oraz maksymalnego ciśnienia rozdmuchiwania ( $p_b$ ) na wartości  $T_p$  w trzech głównych obszarach pojemnika, mianowicie szyjki, korpusu i dna. Najniższe wartości  $T_p$  w chwili opuszczenia formy obserwowano w warunkach minimalnej temperatury  $T_m$  oraz maksymalnego ciśnienia  $p_b$  (rys. 4). Ciśnienie rozdmuchiwania jest więc jednym z czynników determinujących szybkość chłodzenia; z jego wzrostem polepszają się warunki ochładzania pojemnika od wewnątrz, wzrasta również pole kontaktu ścianki pojemnika z powierzchnią gniazda formy.

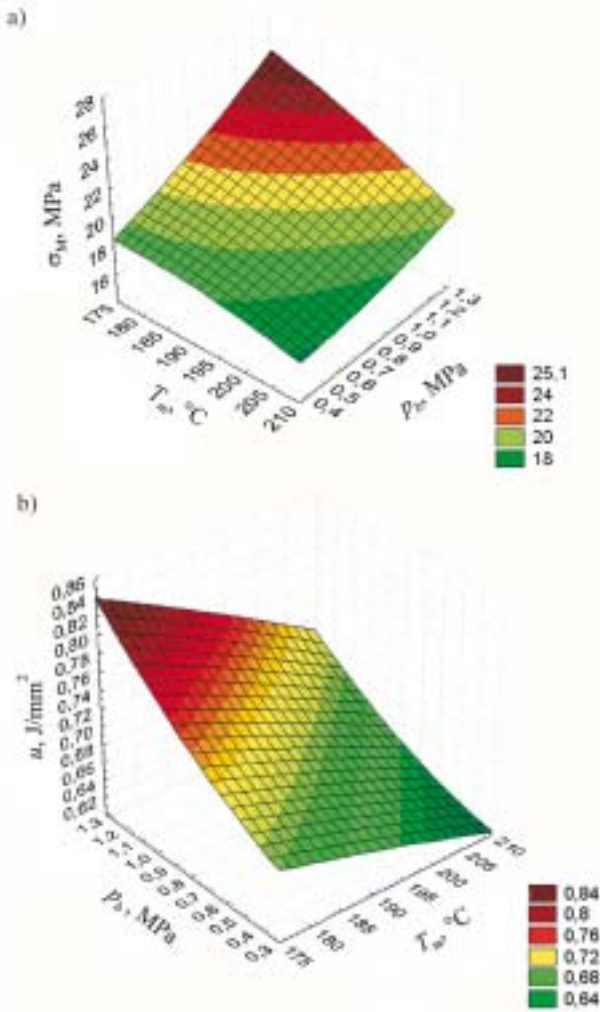
Stwierdzono, że wytrzymałość na rozciąganie udarowe ( $u$ ) oraz statyczne ( $\sigma_m$ ) wytworów zależy od ciśnienia rozdmuchiwania i temperatury wytłoczonego węża (rys. 5). Zwiększenie  $p_b$  i zmniejszenie  $T_m$  powodowało wzrost wartości  $u$  i  $\sigma_m$ .

Parametr chropowatości odwzorowany w postaci profilogramu analizowano odnosząc się do dwóch stron



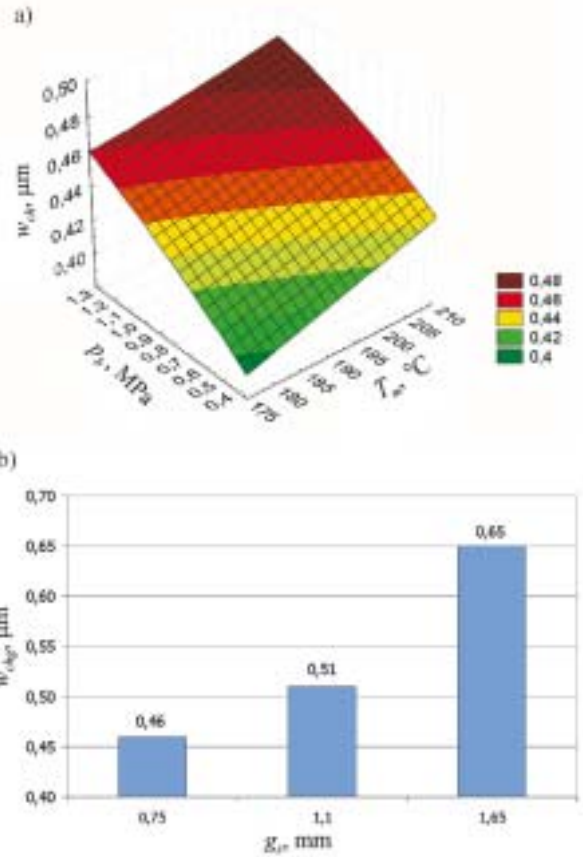
Rys. 4. Zależność temperatury pojemnika ( $T_p$ ) w wybranych obszarach tuż po opuszczeniu gniazda formy od temperatury wytłoczonego węża ( $T_m$ ) i maksymalnego ciśnienia rozdmuchiwania ( $p_b$ ): a) obszar szyjki ( $T_s$ ), b) obszar dna ( $T_d$ ), c) obszar korpusu ( $T_k$ )

Fig. 4. Dependence of temperature of selected area of a container just after leaving the mold cavity on the parison temperature ( $T_m$ ) and maximal blowing pressure ( $p_b$ ): a) area of the neck ( $T_s$ ), b) area of the bottom ( $T_d$ ), c) area of the body ( $T_k$ )



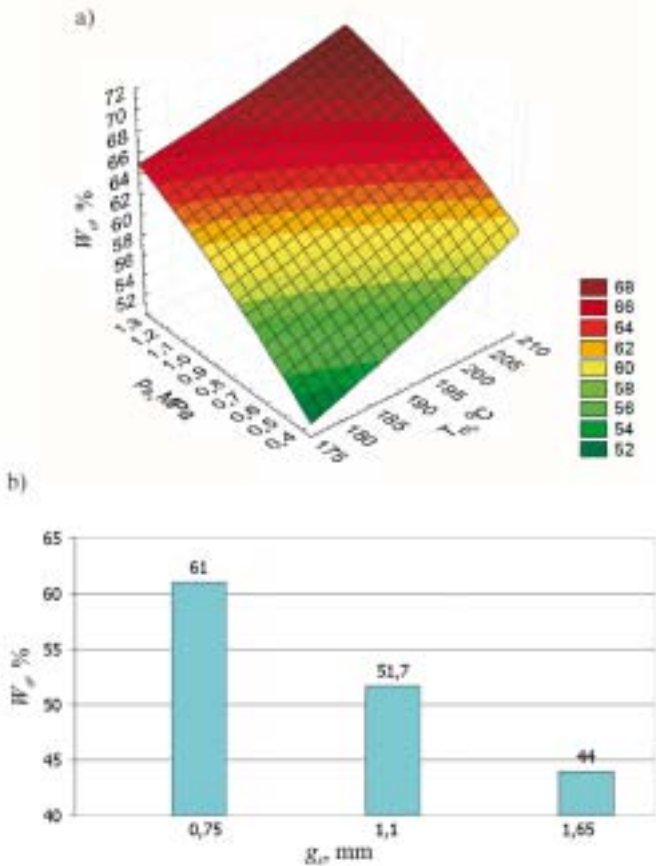
Rys. 5. Wpływ ciśnienia rodmuchiwania ( $p_b$ ) i temperatury wytłaczanego węża ( $T_m$ ) na: a) rozciąganie statyczne ( $\sigma_M$ ), rozciąganie udarowe ( $u$ )

Fig. 5. Effects of blowing pressure ( $p_b$ ) and preform temperature ( $T_m$ ) on: a) tensile strength ( $\sigma_M$ ), b) tensile impact strength ( $u$ )



Rys. 7. a) Wpływ wartości ciśnienia rodmuchiwania ( $p_b$ ) oraz temperatury wytłaczanego węża ( $T_m$ ) na parametr chropowatości powierzchni wewnętrznej ( $w_{ch}$ ); b) wpływ grubości ścianki pojemnika ( $g_s$ ) na parametr chropowatości ( $w_{chg}$ )

Fig. 7. a) Effects of blowing pressure ( $p_b$ ) and parison temperature ( $T_m$ ) on the roughness of inner surface of a container wall ( $w_{ch}$ ); b) effect of a container wall thickness ( $g_s$ ) on roughness parameter ( $w_{chg}$ )



Rys. 6. a) Wpływ ciśnienia rodmuchiwania ( $p_b$ ) i temperatury wytłaczanego węża ( $T_m$ ) na miarę odwzorowania parametru chropowatości gniazda formy na zewnętrznej powierzchni ścianki pojemnika, wskaźnik  $W_o$  (w warunkach stałej grubości  $g_s$ ) oraz b) wpływ grubości ścianki pojemnika ( $g_s$ ) na wskaźnik  $W_{og}$  (w warunkach stałych wartości  $T_m = 190$  °C oraz  $p_b = 0,7$  MPa)

Fig. 6. a) Effects of blowing pressure ( $p_b$ ) and parison temperature ( $T_m$ ) on the measure of mapping of mold cavity roughness at outer surface of a container wall ( $W_o$ ) [at constant thickness ( $g_s$ )]; b) effect of a container wall thickness ( $g_s$ ) on  $W_{og}$  index (at constant values of  $T_m = 190$  °C and  $p_b = 0.7$  MPa)

powierzchni ścianki pojemnika — zewnętrznej ( $w_o$ ) i wewnętrznej ( $w_{ch}$ ) w funkcji  $p_b$ ,  $T_m$  oraz  $g_w$  (wartość  $g_w$  wywiera istotny wpływ na ostateczną grubość ścianki wytworu  $g_s$ ).

Ustalono, że odwzorowanie parametru chropowatości gniazda formującego  $R_{af}$  na zewnętrznej powierzchni ścianki pojemnika polepsza się wraz ze wzrostem wartości  $p_b$  oraz  $T_m$  (rys. 6a), a także ze zmniejszaniem się grubości ścianki wytworu formowanego ( $g_s$ ) (rys. 6b). Podaną na rysunku miarę odwzorowania stanowi wartość wskaźnika  $W_o$ , który zdefiniowano w dalszym tekście.

Lepsze odwzorowanie można tłumaczyć większym naciskiem działającym na ściankę wytworu wraz ze wzrostem ciśnienia rozdmuchiwania, malejącą (na skutek rozdmuchiwania) grubością ścianki wytworu a także większą — w przypadku wyższej temperatury wytłaczanego węża — ilości ciepła zgromadzonego w ściance wytworu rozdmuchiwanego. Zaobserwowano też podobny wpływ  $T_m$  oraz  $p_b$  na wzrost wartości  $w_{ch}$  dotyczącej wewnętrznej powierzchni ścianki wytworu (rys. 7a). Wartość  $w_{ch}$  rosła ponadto wraz ze zwiększaniem się grubości ścianki pojemnika  $g_s$  (rys. 7b), co wiąże się z powstawaniem sprzyjających warunków do zatrzymywania wewnątrz ścianki wytworu większej ilości ciepła. Spowodowało to przedłużenie czasu, w którym podatność ścianki na oddziaływanie ciśnienia rozdmuchiwania była większa dzięki czemu swobodne kształtowanie powierzchni wewnętrznej mogło przebiegać aż do chwili zestalenia się tworzywa.

Kolejnym etapem badań była analiza wpływu  $T_m$  oraz  $p_b$  na wartość wtórnego skurczu przetwórczego [35] — wzdłużnego (osiowego  $S_0$ ) oraz poprzecznego (obwodowego  $S_p$ ). Ustalono, że wartość  $S_p$  jest większa od wartości  $S_0$  a ponadto obydwie zależą od wejściowych wartości  $p_b$  oraz  $T_m$ . Najmniejszy skurcz w obydwu kierunkach uzyskano w warunkach niższej  $T_m$  i wyższego  $p_b$  (rys. 8), co można tłumaczyć lepszą efektywnością chłodzenia, a tym samym ograniczeniem możliwości krystalizacji struktury tworzywa.

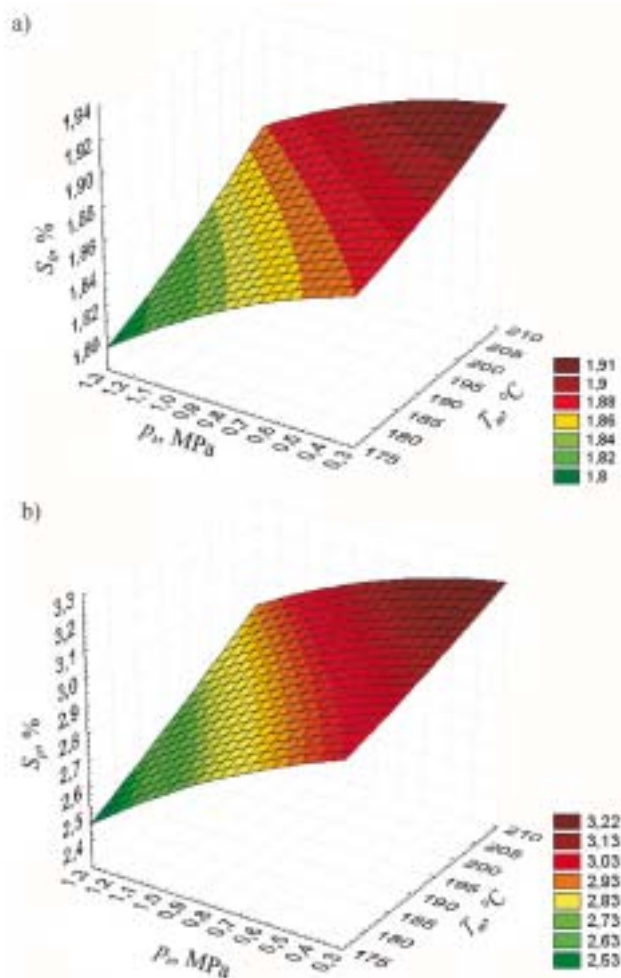
W toku konstruowania form WR należy uwzględnić fakt, że w kierunku obwodowym wytworu, w którym występuje orientacja makrocząsteczek, wartość skurczu jest większa o ok. 1 % (w rozważanym zakresie  $p_b$  oraz  $T_m$ ) od wartości podawanej przez producenta badanego tworzywa. Zaproponowano więc następującą zależność określającą przybliżoną wartość średniego skurczu poprzecznego w odniesieniu do PE-HD:

$$S_p = 1,52 S_0 \quad (1)$$

W rozpatrywanym przypadku można przyjąć, że średnia wartość skurczu wzdłużnego  $S_0$  jest równa wartości podawanej przez producenta, tj. 0,018. Można zatem podać ogólne zalecenia dotyczące wymiaru osiowego  $L_{0g}$  i poprzecznego  $L_{pg}$  gniazda formującego:

$$L_{0g} \approx L_0 + S_c L_0 \quad (2)$$

oraz



Rys. 8. Wpływ ciśnienia rozdmuchiwania ( $p_b$ ) i temperatury wytłaczanego węża ( $T_m$ ) na skurcz przetwórczy: a) wzdłużny — osiowy ( $S_0$ ), b) poprzeczny — obwodowy ( $S_p$ )

Fig. 8. Effects of blowing pressure ( $p_b$ ) and parison temperature ( $T_m$ ) on the processing shrinkage: a) longitudinal — axial  $S_0$ , b) crosswise — circumferential  $S_p$

$$L_{pg} \approx L_p [1 + (S_c + S_{om})] \quad (3)$$

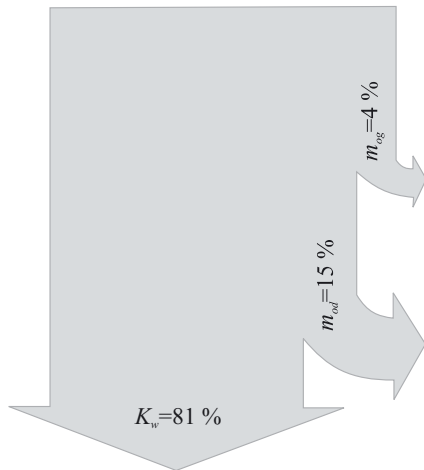
gdzie:  $L_0$  — wymiar konstrukcyjny osiowy wytworu rozdmuchiwanego,  $L_p$  — średni wymiar konstrukcyjny poprzeczny wytworu rozdmuchiwanego,  $S_c$  — wartość skurczu podawana przez producenta,  $S_{om}$  — wartość skurczu wynikająca z orientacji makrocząsteczek (w naszym przypadku — 1% wartości  $S_c$ ).

#### Wskaźniki służące do oceny wydajności i jakości procesu

Na podstawie badań własnych oraz dostępnej literatury [36—38] dokonano również oceny efektywności procesu przetwórstwa oraz cech wytworów wytłaczanych z rozdmuchiwaniem, stosując przyjęty zbiór wskaźników. Były to następujące wskaźniki:

— Wskaźnik wykorzystania tworzywa  $K_w$ :

$$K_w = \frac{m_w}{m_c} \quad (4)$$



Rys. 9. Wskaźnik wykorzystania tworzywa ( $K_w$ ):  $m_{od}$  — masa dolnego odpadu pojemnika,  $m_{og}$  — masa górnego odpadu pojemnika

Fig. 9. Indicator of material use ( $K_w$ ) in its stream flow;  $m_{od}$  — ingot bottom discards of a container,  $m_{og}$  — ingot top discards of a container

gdzie:  $m_c$  — masa tworzywa zużytego na jeden wytwór w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem,  $m_w$  — masa wytworu.

Jak wynika z rys. 9, w opisywanym tu przypadku wartość  $K_w$  wyniosła 81%.

— Wskaźnik przetwórczy  $K_{pt}$ :

$$K_{pt} = w_m \cdot w_p \cdot w_t \cdot w_{ch} \quad (5)$$

gdzie:  $w_m$  — wskaźnik rodzaju tworzywa (przyjęto: tworzywo pierwotne  $w_{mp} = 1$ , wtórne  $w_{mw} = 0,75$ ),  $w_p$  — wskaźnik ciśnienia rozdmuchiwania (w realizowanym zakresie przetwórstwa przyjęto: dolny  $w_{pd} = 0,5$ , środkowy  $w_{ps} = 0,75$ , górny  $w_{pg} = 1$ ),  $w_t$  — wskaźnik temperatury tworzywa wytłaczanego w postaci węża (stosując kryterium właściwości mechanicznych wytworu przyjęto w wykorzystywanym zakresie przetwórstwa: dolny  $w_{td} = 1$ , środkowy  $w_{ts} = 0,75$ , górny  $w_{tg} = 0,5$ ; stosując zaś kryterium odwzorowania parametrów chropowatości gniazda formującego: dolny  $w_{tdo} = 0,5$ , środkowy  $w_{tso} = 0,75$ , górny  $w_{tgo} = 0,1$ )\*.

$$w_{ch} = \left(1 - \frac{t_{w1} - t_{c1}}{t_{c1}}\right) \left(1 - \frac{t_{w2} - t_{c2}}{t_{c2}}\right) \dots \left(1 - \frac{t_{wi} - t_{ci}}{t_{ci}}\right)$$

$w_{ch} \in (0,1>$  — wskaźnik równomierności chłodzenia wytworu:  $t_{w1}, t_{w2}, \dots, t_{wi}$  oraz  $t_{c1}, t_{c2}, \dots, t_{ci}$  — temperatura, odpowiednio, wytworu i cieczy chłodzącej w  $i$ -tej strefie.

— Wskaźnik właściwości geometrycznych wytworu  $K_{gw}$ :

$$K_{gw} = W_{rg} \cdot W_0(W_{ch}) \cdot W_z \cdot W_s \quad (6)$$

$[K_{gw} \in (0,1>]$

gdzie:  $W_{rg} = g_{smi}/g_{sm}$  — wskaźnik równomierności grubości ścianki:  $g_{sm}, g_{smi}$  — grubość maksymalna i minimalna ścianki;  $W_0 = 1 - [(w_n - w_o)/w_n]$  — wskaźnik miary odwzorowania gniazda formy (dotyczy zewnętrznej powierzchni ścianki wytworu),  $w_o$  — wartość parametru chropowatości wytworu,  $w_n$  — wartość parametru chropowatości gniazda narzędzia

odpowiadający  $R_{af}$ ;  $W_{ch} = 1 - [(w_{chw} - w_b)/w_{chw}]$  — graniczny wskaźnik parametru chropowatości (dotyczy wewnętrznej powierzchni ścianki),  $w_{chw}$  — wartość parametru chropowatości założona oraz  $w_b$  — zbadana (rzeczywista);  $W_z = 1 - l_z/l_{pl}$  — wskaźnik długości zgrzeiny:  $l_{pl}$  — długość linii podziału formy,  $l_z$  — długość zgrzeiny\*\*);  $W_s = 1 - (s_n - s_w)/s_n$  — wskaźnik skurczu wytworu rozdmuchiwane:  $s_n, s_w$  — wybrany wymiar gniazda formy  $i$ , odpowiednio, ten sam wymiar wytworu.

— Wskaźnik właściwości mechanicznych wytworu  $K_m$ :

$$K_m = W_u \cdot W_{\sigma_i} \cdot W_\epsilon \cdot W_E \quad (7)$$

$[K_m \in (0,1>]$

gdzie:  $W_u = 1 - [(u_w - u_b)/u_w]$  — wskaźnik graniczny udarności bez karbu:  $u_w$  — udarność wymagana (założona) oraz  $u_b$  — zbadana (rzeczywista);  $W_{\sigma_i} = 1 - [(\sigma_{iw} - \sigma_{ib})/\sigma_{iw}]$  — wskaźnik graniczny naprężenia przy statycznym rozciąganiu:  $\sigma_{iw}$  — wartość wymagana (założona),  $\sigma_{ib}$  — wartość zbadana (rzeczywista);  $W_\epsilon = 1 - [(\epsilon_w - \epsilon_b)/\epsilon]$  — wskaźnik graniczny odkształcenia:  $\epsilon_w$  — odkształcenie wymagane (założone) oraz  $\epsilon_b$  — zbadane (rzeczywiste);  $W_E = 1 - [(E_w - E_b)/E_w]$  — wskaźnik graniczny modułu sprężystości:  $E_w$  — moduł sprężystości wymagany (założony) oraz  $E_b$  — zbadany (rzeczywisty).

W przypadku wskaźników  $K_{pt}$ ,  $K_{gw}$  i  $K_m$ , jeżeli wartość zbadanego wskaźnika składowego jest większa od wartości założonej należy przyjąć wartość 1.

— Wskaźniki stopnia rozdmuchiwania i wewnętrznej orientacji makrocząsteczek  $K_{Bj}$ :  
objętościowy:

$$K_{Bv} = 1 - \frac{V_p}{V_w} \quad (8)$$

$$[K_{Bv} \in (0,1>]$$

gdzie:  $V_p$  — objętość początkowa wytłoczonego węża tworzywa,  $V_w$  — objętość wytworu rozdmuchiwane.

grubościowy:

$$K_{Bg} = 1 - \frac{g_w}{g_{gw}} \quad (9)$$

$$[K_{Bg} \in (0,1>]$$

gdzie:  $g_w$  — średnia grubość ścianki wytworu rozdmuchiwane,  $g_{gw}$  — grubość ścianki węża tworzywa.

liniowy — poprzeczny:

$$K_{Bl} = 1 - \frac{l_p}{l_w} \quad (10)$$

$$[K_{Bl} \in (0,1>]$$

gdzie:  $l_p$  — liniowy początkowy wymiar poprzeczny wytłoczonego węża tworzywa,  $l_w$  — liniowy końcowy wymiar poprzeczny wytworu rozdmuchiwane.

Tabela 1 zawiera zestawienie równań opisujących zależności powyższych wskaźników od niektórych parametrów w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem nieswobodnym.

\*) Ustalono, że  $w_i \in (0,1>$ , a wartości bliższe jedności dotyczą wytworów charakteryzujących się korzystniejszymi właściwościami.

\*\*)  $l_{pl}, l_z$  — wartości uzyskane z pomiarów.

**T a b e l a 1.** Równania opisujące zależności wskaźników procesu wytłaczania z rozdmuchiowaniem nieswobodnym od temperatury wytłaczanego węża ( $T_m$ ), ciśnienia rozdmuchiwania ( $p_b$ ) oraz grubości ścianki wytworu ( $g_s$ )

**T a b l e 1.** Equations describing the dependence of blowing extrusion indices on temperature ( $T_m$ ), container wall thickness ( $g_s$ ) and blowing pressure ( $p_b$ )

Postać równania
$W_{LI} = 0,6509 + 0,0015 \cdot T_m + 0,3377 \cdot p_b - 8,3333E - 6 \cdot (T_m)^2 + -0,0016 \cdot T_m \cdot p_b + 0,0573 \cdot (p_b)^2$
$W_s = -33,3229 + 0,5321 \cdot T_m + 24,8936 \cdot p_b - 0,0014 \cdot (T_m)^2 + -0,1203 \cdot T_m \cdot p_b + 1,7617 \cdot (p_b)^2$
$W_o = 33,5083 - 0,1276 \cdot T_m + 39,5914 \cdot p_b + 0,0011 \cdot (T_m)^2 + -0,1036 \cdot T_m \cdot p_b - 4,4275 \cdot (p_b)^2$
$W_{og}^{*)} = -18,453 g_s + 73,762$ dla $r_{kl} = 0,984$ i $R_{kl} = 96,83$ %
$W_{ch} = -0,618 + 0,0091 \cdot T_m + 0,1866 \cdot p_b - 2,0238E - 5 \cdot (T_m)^2 + -0,0005 \cdot T_m \cdot p_b - 0,0195 \cdot (p_b)^2$
$W_{chg}^{*)} = 0,215 g_s + 0,2892$ dla $r_{kl} = 0,99$ i $R_{kl} = 98,01$ %
$W_{So}^{**}) = 2,1962 - 0,0043 \cdot T_m - 0,151 \cdot p_b + 1,486E - 5 \cdot (T_m)^2 + +0,0007 \cdot T_m \cdot p_b - 0,0325 \cdot (p_b)^2$
$W_{Sp}^{***}) = 3,3919 - 0,008 \cdot T_m - 1,18 \cdot p_b + 3,4524E - 5 \cdot (T_m)^2 + +0,0055 \cdot T_m \cdot p_b - 0,1891 \cdot (p_b)^2$

<sup>\*)</sup>  $r_{kl}$  — błąd pomiaru,  $R_{kl}$  — przedział ufności.

<sup>\*\*)</sup>  $W_{So}$  — wskaźnik skurczu wzdłużnego.

<sup>\*\*\*)</sup>  $W_{Sp}$  — wskaźnik skurczu poprzecznego.

Uwzględniając powyższe kryteria oceny tego procesu i informacje zawarte w publikacjach [37, 38], można zapisać wzór na kompleksowy wskaźnik oceny ( $Q_i$ ) rozdmuchiowania z wytłaczaniem nieswobodnym i cech wytworów otrzymywanych w omawiany sposób:

$$Q_i = \sqrt{K_w \cdot K_{pt} \cdot K_{gw} \cdot K_m \cdot K_{Bi}} \quad (11)$$

$[Q_i \in (0,1 >]$

Przykład obliczenia wartości wskaźnika  $Q_i$  zamieszczono w [39].

#### PODSUMOWANIE

Wykazano, że w wyniku zmiany w analizowanym zakresie podstawowych parametrów wytłaczania z rozdmuchiowaniem nieswobodnym, tj. wartości  $T_m$ ,  $p_b$  oraz  $g_w$ , można w istotny sposób wpłynąć na cechy użytkowe wytworu.

Opracowany szeroki zbiór wskaźników może być podstawą do oceny zarówno tego wariantu przetworstwa, jak i cech uzyskiwanych wytworów. W odniesieniu do rozpatrywanych tu (nastawnych) warunków procesu można przyjąć, że w celu poprawienia cech użytkowych pojemników z bimodalnego PE-HD należy stosować m.in. niższe wartości temperatury węża wytłaczanego ( $T_m = 175$  °C) oraz górne wartości ciśnienia rozdmuchiowania ( $p_b = 1,32$  MPa). Wniosek ten może stanowić zalecenia doboru warunków wytłaczania z rozdmuchiowaniem dotyczących innych wytworów.

Wobec ograniczeń wynikających z konstrukcji formy wytłaczarsko-rozdmuchowej oraz możliwości stanowiska technologicznego do wytłaczania z rozdmuchiowaniem, ważne jest badanie w jak najszerszym zakresie warunków przetworstwa i wyznaczenie najlepszych właściwości wytworu w zależności od przyjętego kryterium, np. wytrzymałościowego bądź geometrycznego.

#### LITERATURA

1. Garbacz T., Tor A.: *Polimery* 2007, **52**, 286.
2. Maridass B., Gupta B. R.: *Polimery* 2007, **52**, 456.
3. Sasimowski E.: *Polimery* 2008, **53**, 47.
4. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2008, **53**, 754.
5. Kaufman M.: „Pierwszy wiek tworzyw sztucznych”, PWN, Warszawa 1966.
6. Glenn L. B., James L.: „Hollow Plastic Parts: Manufacture & Design”, Hanser Publisher, Munich 2004.
7. Norman C. L.: „Blow molding design guide”, Hanser Publisher, Munich 1998.
8. Rosato D. V.: „Blow Molding Handbook”, Hanser Publisher, wyd. 2., Munich 2004.
9. www.plasticseurope.org, Annual Report 2007.
10. Ebnesajjad S.: „Fluoroplastic v. 2 — Melt Processible Fluoropolymers”, William Andrew Publisher 2006.
11. Muccio E. A.: „Plastics Part Technology”, ASM International, 1991.
12. Rosato D. V. i współpr.: „Blow Molding Handbook”, Hanser Publisher, New York 1989.
13. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne”, PL 2006.
14. Chanda M., Roy S. K.: „Plastics Technology Handbook”, Marcel Dekker 1998.
15. Muccio E. A.: „Plastics Processing Technology”, ASM International, 1994.
16. Sikora R., Garbacz T.: *Polimery* 2001, **46**, 540.
17. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993.
18. *Pat. USA* 7 125 241 (2006).
19. Pepliński K., Ohla A., Bieliński M.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2006, nr 1—2, 12.
20. Pepliński K., Bieliński M.: w pracy zbiorowej „Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych” (red. Koszkuł J., Bociąga E.), Częstochowa 2006, str. 176—183.
21. Szczepański K.: „Modelowanie zjawisk zachodzących podczas procesu wytłaczania z rozdmuchiowaniem tworzyw termoplastycznych”, Rozprawa doktorska, Częstochowa 2005.
22. Zawistowski H. i współpr.: „Formowanie wyrobów z tworzyw sztucznych metodą rozdmuchiowania”, Plastech, Warszawa 1998.
23. Flory P. J.: *Polimery* 1987, **32**, 346.
24. Sikora J. W.: *Polimery* 2002, **47**, 435.
25. Sikora R., Jachowicz T.: *Polimery* 2000, **45**, 713.
26. Lutomirski S., Ładysz M.: *Polimery* 1994, **39**, 38.
27. Żenkiewicz M.: *Polimery* 1994, **39**, 215.



28. Materiały firmy DuPont: „Blow Moulding Processing Manual”, DuPont Engineering Polymers, [www.dupont.com/enggpolymer/europe](http://www.dupont.com/enggpolymer/europe), Szwajcaria 2007.
29. Pepliński K., Ohla A., Bieliński M.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2006, nr 3—4, 63.
30. Meckley J., Greene C., Laskowitz I., McConnell J.: *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2004, **43**, 847.
31. Bendada A., Erchiqui F., Kipping A.: *NDT and E Int.* 2005, **38**, 433.
32. [www.borealis.com](http://www.borealis.com): BS2541 Bimodal HDPE for Blow molding.
33. Korzyński M.: „Metodyka eksperymentu — planowanie, realizacja i statystyczne opracowywanie wyników eksperymentów technologicznych”, WNT, Warszawa 2006.
34. Polański Z.: „Planowanie doświadczeń w technice”, PWN, Warszawa 1984.
35. Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
36. Kolman R.: „Ilościowe określanie jakości”, PWE, Warszawa 1973.
37. Wieremiejczyk W.: „Elementy podstaw jakości i niezawodności. Podwyższenie trwałości elementów maszyn”, ODK SIMP, Warszawa 1980.
38. Bieliński M.: *Przegląd Mechaniczny* 1991, nr 9, 23.
39. Pepliński K.: „Badania wpływu warunków przetwórstwa na cechy wytworów wytłaczanych z rodmuchiwaniami”, Rozprawa doktorska, UTP Bydgoszcz 2008.