

MACIEJ HENECZKOWSKI

Politechnika Rzeszowska
Zakład Technologii Tworzyw Sztucznych
ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów
mhen@prz.rzeszow.pl

Symulacja wtryskiwania wielokrotnie przetwarzanych wybranych termoplastów^{*)}

SIMULATIONS OF INJECTIONS OF SELECTED MULTIPROCESSED THERMOPLASTICS

Summary — The deteriorating processability in multiprocessed (injection molding) LDPE, PP, and glass fiber-reinforced PET thermoplastics (Table 1), observed in mold filling and in molded piece warpage (Tables 2—4, 7, 8), was studied by simulations using the I-DEAS Master Series™ 4 system. Melt viscosity of the multiprocessed polymers was modeled by using database-retrieved equations (1a, b) which relate the viscosity to process parameters. Temperature and pressure relations of polymer density allowed to estimate shrinkage variations in the recyclates (Table 2). Simulations showed mold filling to be only slightly affected by viscosity changes. The calculated warpage was distinctly lower in glass fiber-reinforced PET molded pieces than in unreinforced polyolefins. A special holding pressure profile (Table 5) was found to suppress warpage in both polyolefins examined.

Key words: LDPE, PP, glass fiber-reinforced PET, multiple processing, computer simulation using I-DEAS Master Series program, mold filling, shrinkage of recycle, molded piece warpage.

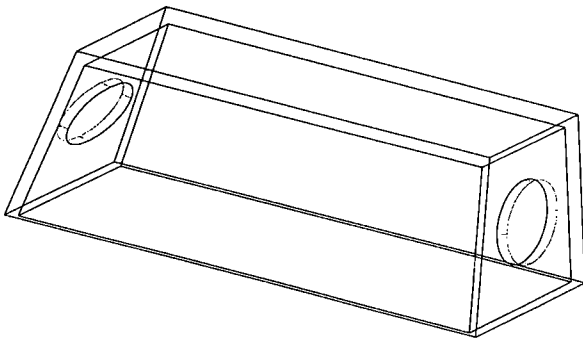
Stosowane podczas recyklingu materiałowego wielokrotne przetwarzanie tworzyw termoplastycznych wiąże się z długotrwałym i powtarzającym się oddziaływaniem temperatury przetwórstwa oraz naprężeń ścinających. Oba te czynniki wpływają na zmianę ciężaru cząsteczkowego polimeru, powstawanie frakcji małych cząsteczkowych, rozgałęzień bocznych oraz nowych grup funkcyjnych, np. $>C=C<$, $>C=O$, $-CHO$ lub $-COOH$ [1—3]. Powyższe zjawiska mogą spowodować istotne zmiany właściwości przetwórczych, takich jak płynność, stabilność termiczna w fazie stopionej, zwiększenie skurczu prasowniczego itp., a również pogorszenie wytrzymałości mechanicznej i odporności polimeru na starzenie pod wpływem promieniowania UV oraz podwyższonej temperatury; stanowiło to przedmiot naszych wcześniejszych badań [3—7]. Celem obecnego opracowania było sprawdzenie na przykładzie kilku wybranych termoplastów (PE-LD, PP i wzmocnionego włóknem szklanym PET) jak wspomniane zmiany właściwości przetwórczych wielokrotnie przetwarzanych polimerów mogą wpłynąć na warunki ich formo-

wania wtryskowego. Ze względu na łatwość analizowania i monitorowania wpływu zmian właściwości polimeru na jego przetwórstwo, do prześledzenia tych procesów zastosowano komputerową symulację wtryskiwania. W literaturze pojawiło się wprawdzie sporo prac na temat symulacji wtryskiwania, w tym powtryskowego paczenia kształtek [8—19], brak jednak wśród nich, tak istotnego z punktu widzenia praktyki technologicznej, wskazania sposobów zapobieżenia pogorszeniu jakości wyprasek wynikającemu z gorszych właściwości przetwórczych recyklatów polimerowych (inna płynność, większy skurcz, gorsza stabilność termiczna itp.). W przedstawionej poniżej pracy zmierzającej do sformułowania odpowiedzi na tak zarysowany problem wykorzystano komputerową symulację wtryskiwania za pomocą programu „I-DEAS Master Series™ 4.0” produkcji firmy SDRC (USA) [20].

WARUNKI SYMULACJI WTRYSKIWANIA

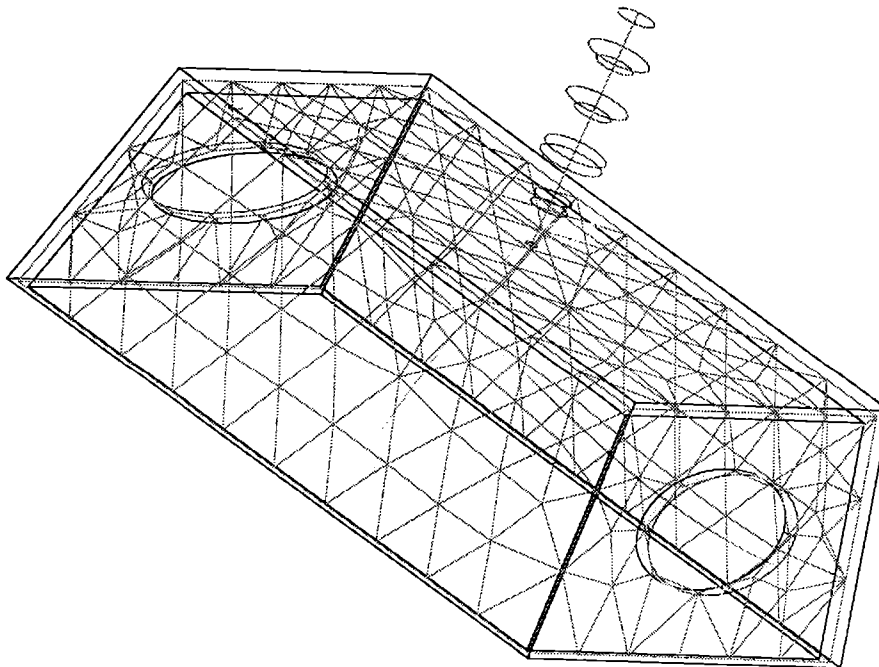
Przeprowadzone analizy odnosiły się do wstępnie wytypowanej i zaprojektowanej kształtki (rys. 1). Wygenerowano powierzchnię środkową tak zbudowanego bryłowego modelu kształtki i nałożono nań siatkę ele-

^{*)} Rozszerzona wersja komunikatu wygłoszonego podczas IV Warsztatów Profesorskich „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Lublin-Kazimierz Dolny 1999 r.

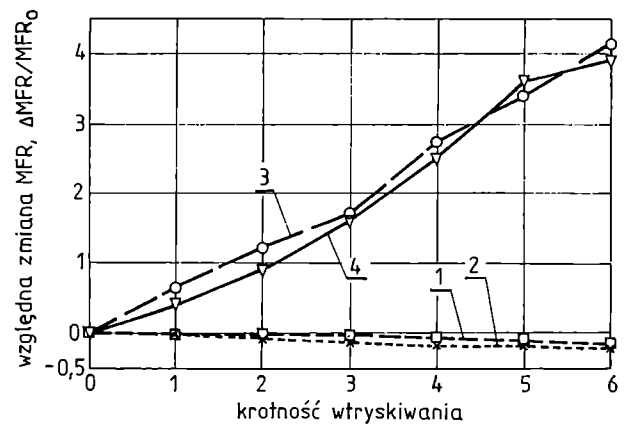


Rys. 1. Bryłowy model analizowanej kształtki — pudełka o wymiarach dna 30×50 mm i grubości 1,6 mm; grubość ścian bocznych wynosiła 1,2 mm a ich kąt pochylecia 10° . Otwory w ścianach bocznych miały kształt elipsy 10×20 mm
 Fig. 1. A 3D model of a piece, viz., a box with a bottom $30 \times 50 \times 1.6$ mm in size and side walls 1.2 mm thick, angle of inclination 10° , and with elliptic holes in side walls, 10×20 mm in size

mentów skończonych (MES); zaprojektowano przy tym układ wlewowy z centralnym punktem wtrysku w środku dna wypraski (rys. 2). Wygenerowanie powierzchni środkowej było niezbędne ze względu na to, że w programie korzysta się z *quasi* 3D modelu wypełniania gniazda formującego, stosując do obliczeń metodę elementów skończonych. Po przyporządkowaniu powierzchni środkowej grubości wynikającej z zależności geometrycznych kształtki, dalsze symulacyjne analizy wypełniania gniazda wykonywano, dzieląc tę



Rys. 2. Model kształtki z wygenerowaną powierzchnią środkową i naniesioną nań siatką trójkątnych elementów skończonych oraz dobudowanym kanałem wlewowym
 Fig. 2. The model of a piece with the generated midsurface covered with finite triangle elements (for FEM analysis) and cold runner



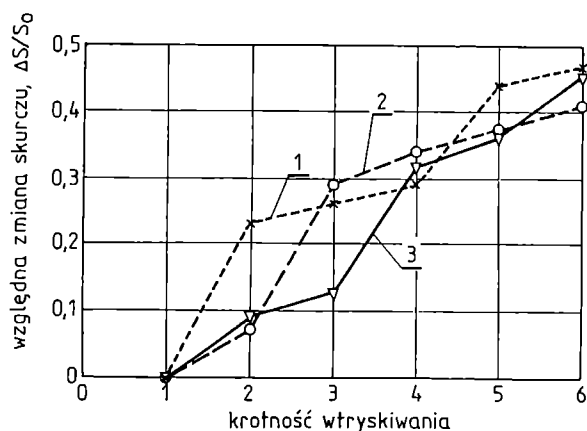
Rys. 3. Zmiany wskaźnika szybkości płynięcia (MFR), analizowanych tworzyw pod wpływem kilkakrotnego przetworstwa [5—7]: 1 — PE-HD, 2 — PE-LD, 3 — PP, 4 — PET
 Fig. 3. Melt flow rate (MFR) variations in multiprocessed (recycled) polymers [5—7]: 1 — HDPE, 2 — LDPE, 3 — PP, 4 — PET

grubość na 24 warstwy, co gwarantowało uzyskanie największej dokładności dostępnej w programie.

Uznano, iż właściwości zmieniające się podczas kilkakrotnego recyklingu i wywierające najistotniejszy wpływ na jakość formowanej kształtki, a dające się przy tym stosunkowo łatwo modelować w procesie analizy, to lepkość polimeru wypełniającego gniazdo i skurcz prasowniczy tworzywa. Na podstawie wcześniejszych prac [7] stwierdzono, iż lepkość polietylenu — zarówno PE-HD, jak i PE-LD — zwiększa się w trakcie wielo-

krotnego wtryskiwania (rys. 3). Wpływa to na pogorszenie warunków wypełniania formy, co utrudnia proces przetwórstwa. Sytuacja zmienia się w przypadku PP i PET, kiedy to zmiany lepkości mają odwrotny charakter i większą intensywność [5, 6] (rys. 3). W odniesieniu do tych ostatnich tworzyw można zatem oczekiwać łatwiejszego wypełniania gniazda formującego wraz ze zwiększaniem krotności recyklingu.

Zależność drugiej z omawianych właściwości — skurczu prasowniczego — od krotności wtryskiwania ma w przypadku wszystkich poddawanych analizie tworzyw podobny, rosnący charakter (rys. 4). Oznacza



Rys. 4. Zmiany pierwotnego skurczu prasowniczego (S) wybranych do symulacji tworzyw pod wpływem kilkakrotnego przetwórstwa [5–7]: 1 — PE-LD, 2 — PP, 3 — PET

Fig. 4. Injection molding shrinkage variations in multiprocessed (recycled) polymers [5–7]: 1 — LDPE, 2 — PP, 3 — PET

to, że poddawane recyklingowi materiałowemu tworzywo będzie wykazywało większy skurcz prasowniczy, a więc i otrzymana kształtka będzie bardziej podatna na powtryskową deformację. Istotnym praktycznym celem tak zaplanowanych analiz byłaby odpowiedź na następujące pytanie: czy można — a jeśli tak, to w jaki sposób — za pomocą odpowiedniej modyfikacji technologicznych parametrów wtryskiwania tak pokierować procesem formowania recyklatu, aby zminimalizować negatywny wpływ omawianych zmienionych właściwości przetwórczych tego materiału na jakość wyprasek. Wynikiem tego działania powinno być uniknięcie konieczności wprowadzania ewentualnych konstrukcyjnych zmian wypraski lub gniazda formującego, które zapobiegałyby pogorszeniu jakości wyprasek z recyklatu. Takie zmiany wiązałyby się z koniecznością remontu formy wtryskowej.

Do przeprowadzenia symulacji wtryskiwania wytypowano następujące tworzywa wybrane z bazy materiałowej programu: PE-LD o masowym wskaźniku szybkości płynięcia $MFR = 2,0$ g/10 min, oraz PP o wartości $MFR 4,5$ g/10 min i dużym skurczu (2,5–4,0%).

T a b e l a 1. Charakterystyka tworzyw użytych do symulacji wtryskiwania, wybranych z bazy *pssmat* programu „I-DEAS MS™ 4.0”¹⁾

T a b l e 1. The initial property data of plastics used in computer simulations retrieved from the *pssmat* database (I-DEAS MS™ 4.0 program)

Właściwość	Wartość dotycząca danego polimeru		
	PE 1	PP 1	PET 1
Temperatura mięknięcia wg Vicata, °C	90	105	195
Temperatura zaniku płynięcia stopu, °C	161	170	195
Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (MFR), g/10 min	2,0	4,5	—
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, 1/K	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$
Przewodnictwo cieplne, W/m K	0,312	0,117	0,217
Stała I w równaniu Williamsa-Landela-Ferry'ego	17,4	-4,82	17,4
Stała II w równaniu Williamsa-Landela-Ferry'ego	91,6	-28,32	56,1
Moduł ściśliwości, MPa	17,6	446	2020
Moduł sprężystości, MPa	19,0	29,7	1240
Maksymalna temperatura wtryskiwania, °C	240	255	300
Minimalna temperatura wtryskiwania, °C	160	200	270
Zalecana temperatura wtryskiwania, °C	190	207	285
Zalecana temperatura formy, °C	20	28	80
Maksymalna dopuszczalna, chwilowa temperatura stopu, °C	280	300	340
Maksymalne dopuszczalne naprężenie styczne, Pa	100 000	340 000	540 000
Maksymalna dopuszczalna, chwilowa szybkość ścinania, s ⁻¹	45 000	100 000	40 000

¹⁾ Lepkość i gęstość polimeru zostały opisane za pomocą modelowych równań (1a), (1b) i (2).

Podstawowe właściwości tych tworzyw zostały podane w tabeli 1. Dobierając te dwa materiały — PE-LD oraz PP — kierowano się ich zbliżonymi właściwościami przetwórczymi; są to tworzywa częściowo krystaliczne, o dobrej stabilności termicznej i podobnej lepkości w stanie stopionym. Dla porównania wybrano także tworzywo z grupy tzw. konstrukcyjnych (PET) dodatkowo wzmocnione włóknem szklanym, co pozwoliło na porównanie wpływu napelnacza wzmacniającego na analizowane właściwości. Należy jednak dodać, że podczas analizy wtryskiwania wzmocnionego włóknem szklanym PET nie uwzględniono znanego z literatury [21] zjawiska łamania i zarysowywania włókien podczas kilkakrotnego przechodzenia polimeru przez układ uplastyczniający maszyny przetwórczej. Uznano, że efekt ten wywiera istotniejszy wpływ na wytrzymałościowe, a nie przetwórcze właściwości recyklatu.

Wyjściowe tworzywa oznaczono symbolem 1, odpowiednio więc PE 1, PP 1, PET 1. Symulacji wpływu kilkakrotnego wtryskiwania na właściwości przetwórcze analizowanych tworzyw dokonywano dzięki dostępnej w programie „I-DEAS MS™ 4.0” bazie o nazwie *pssmat* modyfikując przy tym zawarte w niej równania modelowe opisujące zależności lepkości stopionego polimeru [równanie (1a) w przypadku PE oraz (1b) w odniesieniu

do PP i PET] i jego gęstości ρ [równanie (2)] od parametrów przetwórczych w wyniku odpowiedniej zmiany niżej wskazanych współczynników występujących w tych równaniach. W odniesieniu do materiałów o zmodyfikowanych właściwościach zastosowano symbol 2, odpowiednio: PE 2, PP 2 i PET 2.

$$\eta = \frac{[B_{1i} \cdot \exp(0,74 \cdot 10^4 / A_2) \cdot \exp(0,15 \cdot 10^{-7} A_3)]}{1 + \left\{ [0,37 \cdot \exp(0,57 \cdot 10^4 / A^2) \cdot \exp(0,15 \cdot 10^{-7} \cdot A^3)] \frac{A^4}{0,132 \cdot 10^6} \right\}^{0,612}} \quad (1a)$$

gdzie: η — lepkość stopionego polimeru, Pa·s; B_{1i} — współczynnik (odpowiednik η_0), przy czym B_{1i} zmieniano w zakresie od 0,35 (PE 1) do 0,40 (PE 2); A_2 — temperatura, w zakresie 403—553 K; A_3 — ciśnienie, Pa; A_4 — szybkość ścinania, w zakresie 10^0 — $10^3 \cdot s^{-1}$.

$$\eta = B_{1i} \cdot A_4^{a_i} \cdot \exp(B_{2i} \cdot A_2) \quad (1b)$$

gdzie: B_{1i} — współczynnik (odpowiednik η_0), przy czym B_{1i} zmieniano od -0,00684 (PP 1) do -0,00600 (PP 2) oraz od -0,005782 (PET 1) do -0,00550 (PET 2); a_i — (wykładnik płynięcia -1), przy czym $a_i = -0,7271$ (PP 1 i PP 2) oraz $a_i = -0,6883$ (PET 1 i PET 2); B_{2i} — stała (odpowiednik energii aktywacji płynięcia), przy czym $B_{2i} = -0,006844$ (PP 1 i PP 2) oraz $B_{2i} = -0,005782$ (PET 1 i PET 2).

$$\rho = \frac{\rho_{0i} \cdot (1,0 + A_5 / \rho_{0i})}{1,0 + (A_6 - 27,0) A_7} \quad (2)$$

gdzie: ρ — gęstość, kg/m^3 ; ρ_{0i} — stała, przy czym w przypadku PE $\rho_{0i} = 770$, PP = 760, PET = 1140; A_5 — ciśnienie, w przedziale $(0,1-2,5) \cdot 10^9$ Pa; ρ_{0i} — stała, przy czym w przypadku PE $\rho_{0i} = 1,6516 \cdot 10^9$, PP = $1,6123 \cdot 10^9$, PET = $2,1373 \cdot 10^{10}$; A_6 — temperatura, °C; A_7 — współczynnik rozszerzalności cieplnej, którego wartość zmieniano w przypadku PE od 0,0002 do 0,0004 1/K, PP od 0,00018 do 0,0018 1/K, PET od 0,000056 do 0,000080 1/K.

Do przeprowadzenia pełnej analizy wtryskiwania przyjęto parametry przetwórcze wybrane na podstawie wartości zalecanych w odniesieniu do poszczególnych tworzyw w bazie materiałowej (por. wartości zalecane w tabelach 1, 2, 3 i 4) i wstępnej, przybliżonej symulacji („Process Scan” [20]).

WYNIKI ANALIZ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki symulacji wypełniania gniazda zebrano w tabelach 2, 3 i 4. Jak wynika z zestawionych tam danych, w odniesieniu do wtryskiwanych poliolefin nie nastąpiło wyraźne przekroczenie dopuszczalnych war-

Tabela 2. Parametry wypełniania gniazda formującego charakterystyczne dla polietylenu o właściwościach symulujących efekty procesów zachodzących podczas wielokrotnego przetwórstwa

Tabela 2. Mold filling parameters calculated for PE having property data used to simulate the effect of multiprocessing

Rodzaj parametru	Wartość dopuszczalna	Wartość ekstremalna wyznaczona w odniesieniu do analizowanych przypadków					
		PE 1 ¹⁾	PE 2 ²⁾	PE 1 B ³⁾	PE 2 B ³⁾	PE 1 C ⁴⁾	PE 2 C ⁴⁾
Maksymalna, chwilowa temperatura stopionego polimeru, °C	<280	229	232	254	275	230	232
Szybkość ścinania, s ⁻¹	<4,5·10 ¹	3,7·10 ¹	3,8·10 ¹	4,8·10 ¹	3,7·10 ¹	3,8·10 ¹	4,5·10 ¹
Naprężenie styczne, MPa	<0,500	<u>0,530</u>	<u>0,536</u>	<u>0,540</u>	<u>0,740</u>	<u>0,529</u>	<u>0,540</u>
Temperatura czola stopionego polimeru, °C	>164	219,7	<u>163,5</u>	219,9	187,6	219,7	219,5
Ciśnienie wtryskiwania, MPa	<236	19,0	19,0	19,0	20,8	19,0	21,0
Sila rozwierająca, MN	<1,12	0,026	0,028	0,028	0,033	0,026	0,025

¹⁾ PE 1 — tworzywo wyjściowe; PE 2 — tworzywo o zwiększonej lepkości i zwiększonym w stosunku do PE 1 skurczu. ³⁾ Ciśnienie w trakcie fazy wypełniania programowane zgodnie z założonym profilem (por. tabela 6). ⁴⁾ Ciśnienie w trakcie fazy docisku programowane według założonego profilu (por. tabela 6).

Tabela 3. Parametry wypełniania gniazda formującego charakterystyczne dla polipropylenu o właściwościach symulujących efekty procesów zachodzących podczas wielokrotnego przetwórstwa

Tabela 3. Mold filling parameters calculated for PP having property data used to simulate the effect of multiprocessing

Rodzaj parametru	Wartość dopuszczalna	Wartość ekstremalna wyznaczona w odniesieniu do analizowanych przypadków			
		PP 1 ¹⁾	PP 2 ²⁾	PP 1 B ³⁾	PP 2 B ³⁾
Maksymalna, chwilowa temperatura stopionego polimeru, °C	<300	242,6	239,8	242,6	239,8
Szybkość ścinania, s ⁻¹	<1,0·10 ⁵	4,00·10 ¹	2,43·10 ¹	3,98·10 ¹	2,43·10 ¹
Naprężenie styczne, MPa	<0,340	0,305	0,286	0,308	0,286
Temperatura czola stopionego polimeru, °C	>186	219,7	<u>163,5</u>	219,7	219,5
Ciśnienie wtryskiwania, MPa	<236	20,0	20,0	20,0	20,0
Sila rozwierająca, MN	<1,12	0,068	0,068	0,063	0,063

¹⁾ PP 1 — tworzywo wyjściowe; PP 2 — tworzywo o zmniejszonej lepkości i zwiększonym w stosunku do PP 1 skurczu. ³⁾ Ciśnienie w trakcie fazy docisku programowane według założonego profilu (por. tabela 5, program 3).

Tabela 4. Parametry wypełniania gniazda formującego charakterystyczne dla poli(tereftalanu etylenu) o właściwościach symulujących efekty procesów zachodzących podczas wielokrotnego przetwórstwa

T a b l e 4. Mold filling parameters calculated for PET having property data used to simulate the effect of multiprocessing

Rodzaj parametru	Wartość dopuszczalna	Wartość ekstremalna wyznaczona w odniesieniu do analizowanych przypadków			
		PET 1 ^{*)}	PET 2 ^{*)}	PET 1 B ^{**)}	PET 2 B ^{**)}
Maksymalna, chwilowa temperatura stopionego polimeru, °C	<340	295,2	295,2	306,2	306,4
Szybkość ścinania, s ⁻¹	<4,0·10 ⁴	2,97·10 ³	2,98·10 ³	7,75·10 ³	7,75·10 ³
Naprężenie styczne, MPa	<0,540	0,452	0,540	<u>1,03</u>	<u>1,03</u>
Temperatura czola stopionego polimeru, °C	>240	<u>140</u>	<u>140</u>	<u>240</u>	<u>240</u>
Ciśnienie wtryskiwania, MPa	<236	190,0	190,0	190,0	200,0
Sila rozwierająca, MN	<1,12	0,26	0,28	0,26	0,25

^{*)} PET 1 — tworzywo wyjściowe; PET 2 — tworzywo o zmniejszonej lepkości i zwiększonym w stosunku do PET 1 skurczu. ^{**)} Ciśnienie w trakcie fazy docisku programowane według założonego profilu (por. tabela 7).

tości parametrów technologicznych. W przypadku symulacji wypełniania polietylenu można zauważyć niewielkie przekroczenie (o niecałe 10%) dopuszczalnego naprężenia stycznego (tabela 2). Jedynie w odniesieniu do PE 2 B — polimeru o większej lepkości, wtryskiwanego z programowanym ciśnieniem wypełniania — widać wyraźne, bo ok. 50-proc. przekroczenie zalecanej wartości tego naprężenia i zbliżenie się do dopuszczalnej, chwilowej temperatury wtryskiwanego polimeru (275°C wobec dopuszczalnej 280°C). Jest to efekt zwiększonej lepkości stopionego polimeru i zmniejszonego ciśnienia w początkowej fazie wypełniania gniazda tworzywem; po zwiększeniu ciśnienia w późniejszej fazie powoduje ono szybsze wypełnianie, a w wyniku tego — wzrost naprężenia stycznego i przegrzania stopu. Na podstawie wyników symulacji dotyczących dwóch typów polietylenu — PE 1 i PE 2 — można wyraźnie prześledzić pogorszenie się warunków wypełniania w przypadku polimeru o większej lepkości (PE 2) uwiadaczające się wyższymi chwilowymi wartościami temperatury stopionej masy i nieco większymi wartościami naprężenia stycznego oraz szybkości ścinania, z równocześnie silniejszym przechłodzeniem czola płynącego tworzywa. Podobne obserwacje można odnieść do polipropylenu; trzeba jednak pamiętać o tym, że w tym przypadku lepkość PP 1 jest większa niż lepkość PP 2 (tabela 3).

W porównaniu z analizowanymi poliolefinami, właściwości przetwórcze poli(tereftalanu etylenu) są dużo gorsze. Objawia się to głównie tym, że w przypadku PET uzyskuje się niedostateczne wypełnienie gniazda w warunkach ustalonego ciśnienia wypełniania i to pomimo zastosowania bardzo dużej jego wartości (~ 200 MPa). Zaznaczyło się to jako zbyt duże przechłodzenie czola wtryskiwanego polimeru, gdyż uzyskana w wyniku przeprowadzonej symulacji temperatura jest o 100°C niższa od dopuszczalnej (tabela 4). Dopiero zastosowanie krótszego czasu wtryskiwania i programowanego ciśnienia w fazie wypełniania pozwoliło na zbliżenie się do żądanej temperatury czola stopionego polimeru. Spowodowało to co prawda dwukrotne zwiększenie szybkości ścinania, ale i tak nie osiągnęła

ona nawet 20% wartości dopuszczalnej. Nie stwierdzono natomiast, praktycznie biorąc, żadnych różnic w wartościach parametrów wypełniania w odniesieniu do analizowanych próbek PET o różnej lepkości (PET 1 i PET 2).

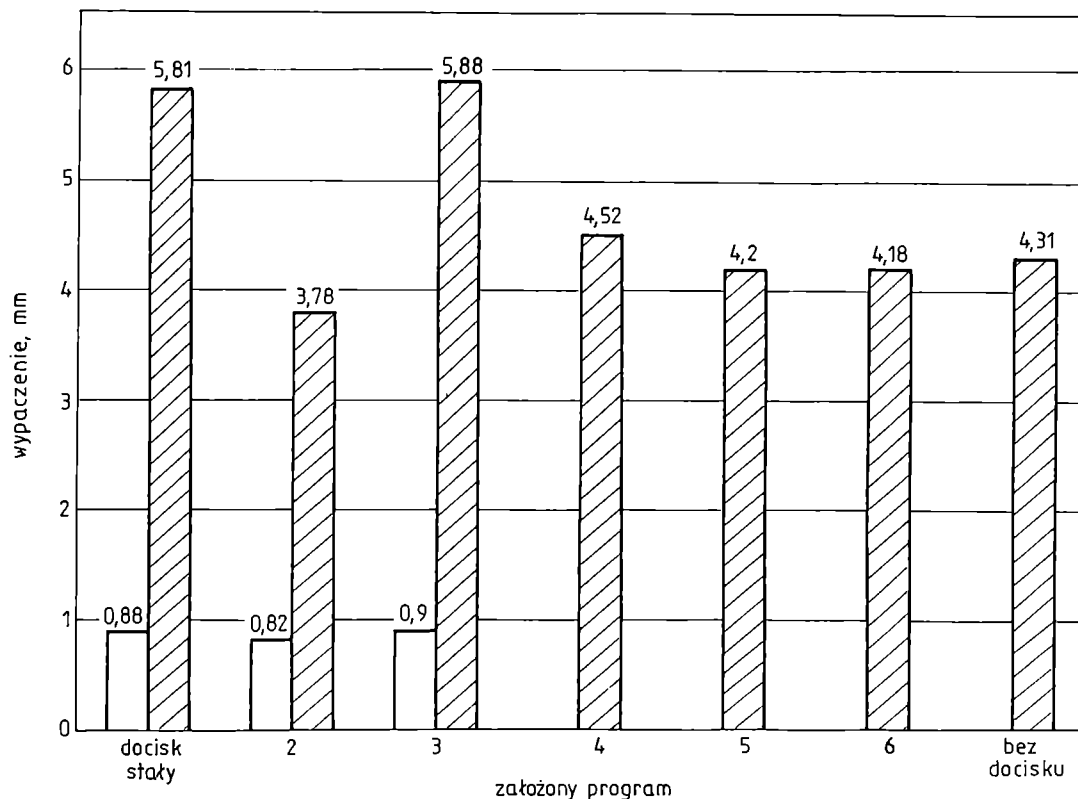
Zdecydowanie większe różnice wystąpiły natomiast podczas symulacji powtryskowego paczenia się kształtek z analizowanych tworzyw. Największe odkształcenia powtryskowe wystąpiły w przypadku PP, który już z bazy danych wybrano jako materiał o dużym skurczu. Znaczne, bo dziesięciokrotne zwiększenie współczynnika rozszerzalności cieplnej [równanie (2)], mające symulować wyraźny przyrost skurczu tworzywa wskutek kilkakrotnego przetwórstwa, zaowocowało niemal sześciokrotnym przyrostem powtryskowego odkształcenia wypraski (rys. 5 — PP 1 i PP 2). Dzięki odpowiedniemu zaprogramowaniu ciśnienia wtryskiwania udało się ograniczyć odkształcenie o ok. 40% (por. rys. 5 i tabela 5: wartości dotyczące wtryskiwania PP 2 ze stałym dociskiem i z dociskiem według programu 2). Z tego punktu widzenia najkorzystniejsze okazało się

Tabela 5. Założone do wykonania symulacji wartości ciśnienia w trakcie wtryskiwania polipropylenu, odniesione do nominalnego ciśnienia wypełniania 20 MPa (por. rys. 5)

T a b l e 5. Injection molding pressure profiles used in PP simulations (relative to nominal filling pressure of 20 MPa) (cf. Fig. 5)

Faza ^{*)}	Czas cyklu s	Względna wartość ciśnienia wtryskiwania, %						
		bez docisku	docisk stały	program 2	program 3	program 4	program 5	program 6
A	0	100	100	100	100	100	100	100
	1	100	100	100	95	100	100	100
	2	100	100	100	90	100	100	100
B	2,1	0	100	100	100	100	0,1	0,1
	4	0	100	100	100	45	1	0,1
	8	0	100	1	100	10	100	1
	12	0	100	0,1	10	1	100	1
	27	0	100	0,1	0,5	0,1	0,1	100
	34	0	100	0,01	0,1	0,01	0,01	10

^{*)} A — faza wypełniania, B — faza docisku i chłodzenia.



Rys. 5. Modelowanie powtryskowej deformacji kształtki w odniesieniu do założonych różnych programów ciśnienia wtryskiwania polipropylenu (wg tabeli 5): □ — PP 1, ▨ — PP 2

Fig. 5. Simulation of PP molded piece warpage variations for various programmed holding pressure profiles (Table 5): □ — PP 1, ▨ — PP 2

programowanie docisku w ten sposób, że w początkowej jego fazie, do ok. 2 s, utrzymywano duże ciśnienie — równe ciśnieniu wtryskiwania, a następnie zmniejszono je gwałtownie, by po dalszych 6 s osiągnąć wartość wynoszącą zaledwie 1% nominalnej (tabela 5, program 2). Mniej korzystne okazały się programy 5 i 6, a nieco gorsze od nich — wtryskiwanie bez fazy docisku. Na deformację wywiera wpływ wiele czynników, takich jak temperatura formy i rozkład tej temperatury, temperatura wtryskiwania, ciśnienie szczątkowe (a więc czas i ciśnienie w fazie docisku) oraz szybkość wtryskiwania (orientacja makrocząsteczek w kierunku wtryskiwania) [8, 10, 12, 14—17, 19]. Można zatem sądzić, że w przypadku analizowanego PP podstawowym źródłem ograniczenia tej niekorzystnej deformacji jest skrócenie czasu działania dużego ciśnienia w fazie docisku do niezbędnego minimum, to jest do chwili zasklepienia wlewka, po to by osiągnąć jak najmniejsze ciśnienie szczątkowe w gnieździe podczas stopniowego chłodzenia wypraski. To spostrzeżenie potwierdza częściowo fakt, że zaprogramowanie ciśnienia w fazie wypełniania gniazda doprowadziło do zadowalającego ograniczenia wspomnianego odkształcenia (rys. 5, tabela 5, program 3). Powyższe spostrzeżenia posłużyły do opracowania programowanego wtryskiwania pozostałych analizowanych polimerów. Przeprowadzone symulacje potwier-

Tabela 6. Wpływ wybranych programów ciśnienia wtryskiwania na uzyskane w wyniku symulacji powtryskowe odkształcenie wypraski z analizowanych polietylenów

Table 6. PE warpage data obtained by using selected injection molding pressure profiles

Rodzaj tworzywa	Maksymalne wypaczenie analizowanej kształtki, mm			
	stały docisk	wypełnianie z programowanym ciśnieniem	programowany docisk	
			program 1 (PE)	program 2 (PE)
PE 1	0,52	0,59	0,52	0,56
PE 2	0,60	0,70	0,53	0,58

Tabela 7. Wpływ wybranych programów ciśnienia wtryskiwania na uzyskane w wyniku symulacji powtryskowe odkształcenie wypraski z analizowanych PET

Table 7. PET warpage data obtained by using selected injection molding pressure profiles

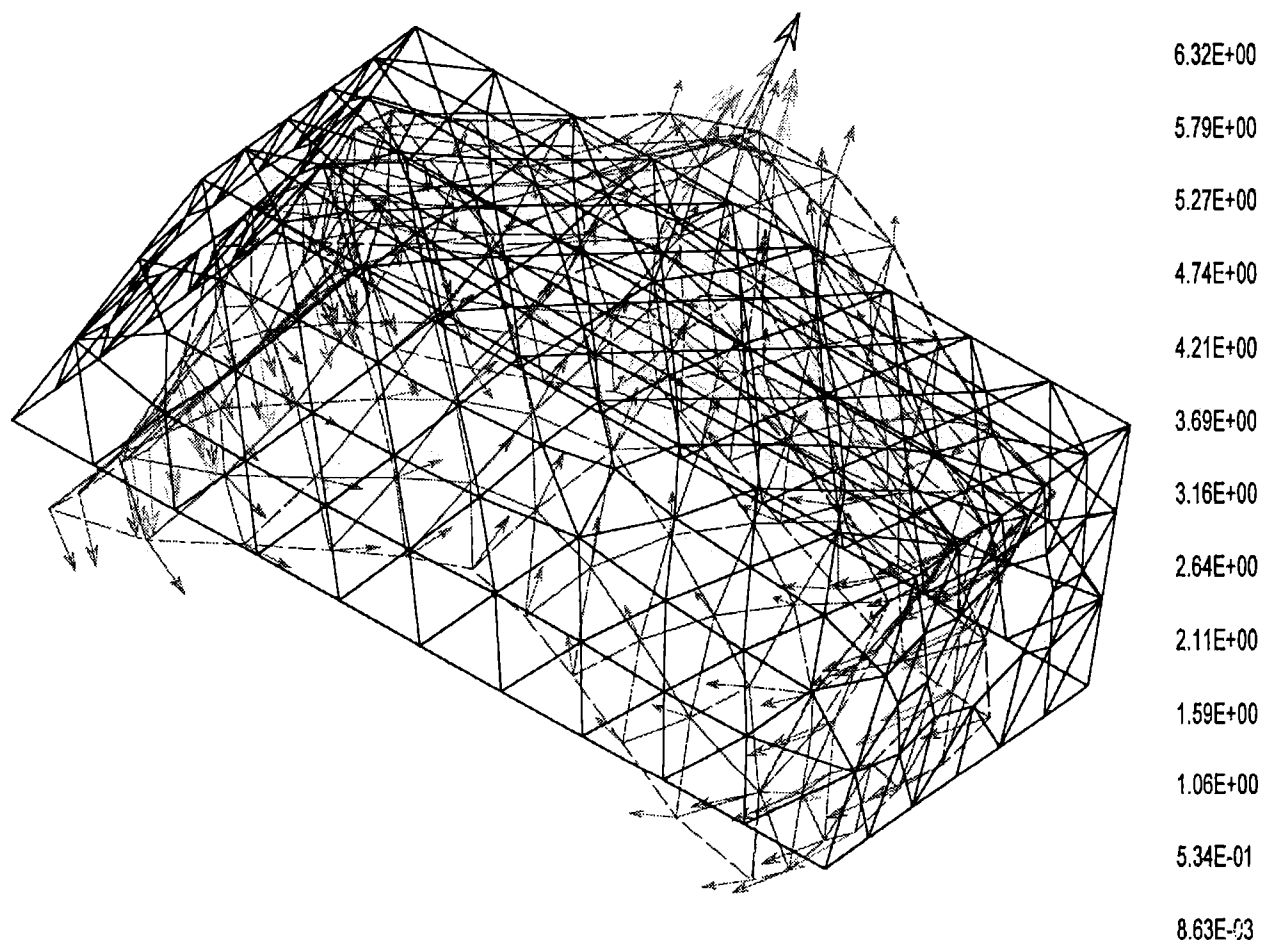
Rodzaj tworzywa	Maksymalne wypaczenie analizowanej kształtki, mm			
	czas docisku równy 0	stałe ciśnienie docisku	programowane zmniejszanie ciśnienia docisku	
			powolne	gwałtowne
PET 1	0,06	0,13	0,14	—
PET 2	0,08	0,15	0,15	0,08

dzają, że wyglądająca podobnie jak w przypadku programu 2 dotyczącego PP (tabela 5) zależność ciśnienia docisku od czasu okazała się najkorzystniejsza również w odniesieniu do PE 1 i PE 2 oraz PET 1 i PET 2.

Wartości maksymalnego przemieszczenia dotyczące PET 1 i PET 2 różniły się bardzo wyraźnie od odkształcenia powtryskowego czterech pozostałych materiałów (tabele 5, 6 i 7). Maksymalne przemieszczenie ścianek odkształconego modelu ze wzmocnionego PET w stosunku do modelu nieodkształconego, nawet w przypadku najmniej korzystnego programu wypełniania gniazda, nie przekraczało 0,15 mm (tabela 7). Dodatkowo warto podkreślić występowanie niewielkich tylko różnic między maksymalnymi przemieszczeniami PET o mniejszym skurczu (PET 1) a PET o większym skurczu (PET 2). Wartości przemieszczeń dotyczące PET są prawie czterokrotnie mniejsze niż w przypadku podobnych warunków wtryskiwania PE lub PP (por. rys. 5, tabele 6 i 7). Można sądzić, że jest to dodatkowy efekt wprowadzenia zbrojenia z włókna szklanego do PET, ponieważ wykonane wcześniej symulacje paczenia niezbrojonego PET prowadziły do wartości odkształcenia

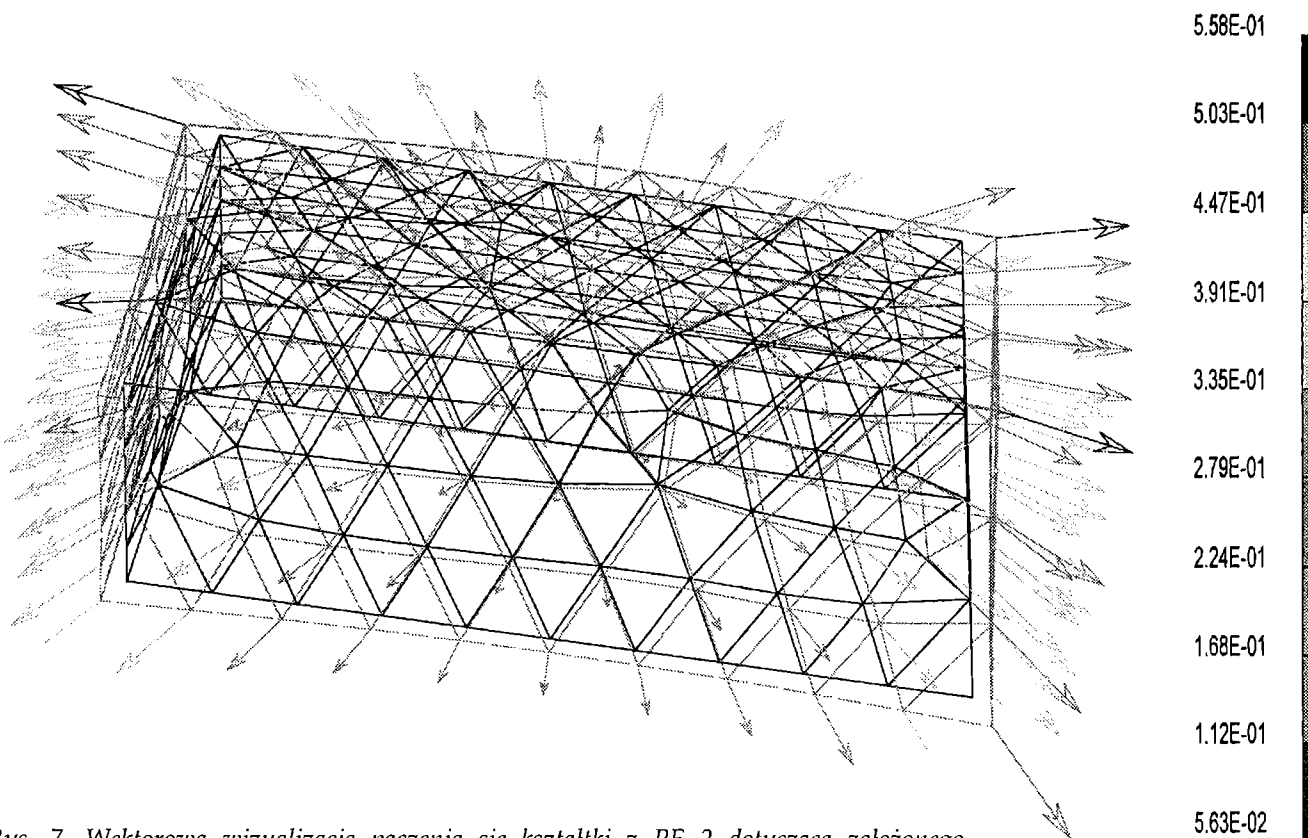
zbliżonych do wartości dotyczących analizowanych poliolefin.

Dodatkowych informacji dostarcza także wizualizacja paczenia kształtek z analizowanych tworzyw. Deformacja kształtki z PP 2 jest bardzo silna i polega głównie na wybrzuszeniu dna pudełka na zewnątrz, a w wyniku tego — na zbliżeniu bocznych jego ścianek (rys. 6). Przemieszczenie tego elementu zwiększa się wraz z przedłużaniem czasu działania ciśnienia podczas docisku. Podobne odkształcenie dna pudełka daje się zauważyć w przypadku PE 2 (rys. 7). Tendencja do takiego odkształcenia maleje wraz z przejściem od tworzywa o większym skurczu do materiału o mniejszym skurczu prasowniczym, a więc i mniejszym maksymalnym przemieszczeniu elementów modelu zdeformowanego względem kształtki nieodkształconej. Tak więc w przypadku PET 1 oraz PET 2 odkształcenie to ma wyraźnie inny charakter (rys. 8) — następuje tu zapadnięcie się dna i wyboczenie ścianek pudełka na zewnątrz kształtki. Pełne wyjaśnienie mechanizmu zaobserwowanych efektów wymaga jeszcze szczegółowej weryfikacji doświadczalnej i analitycznej.



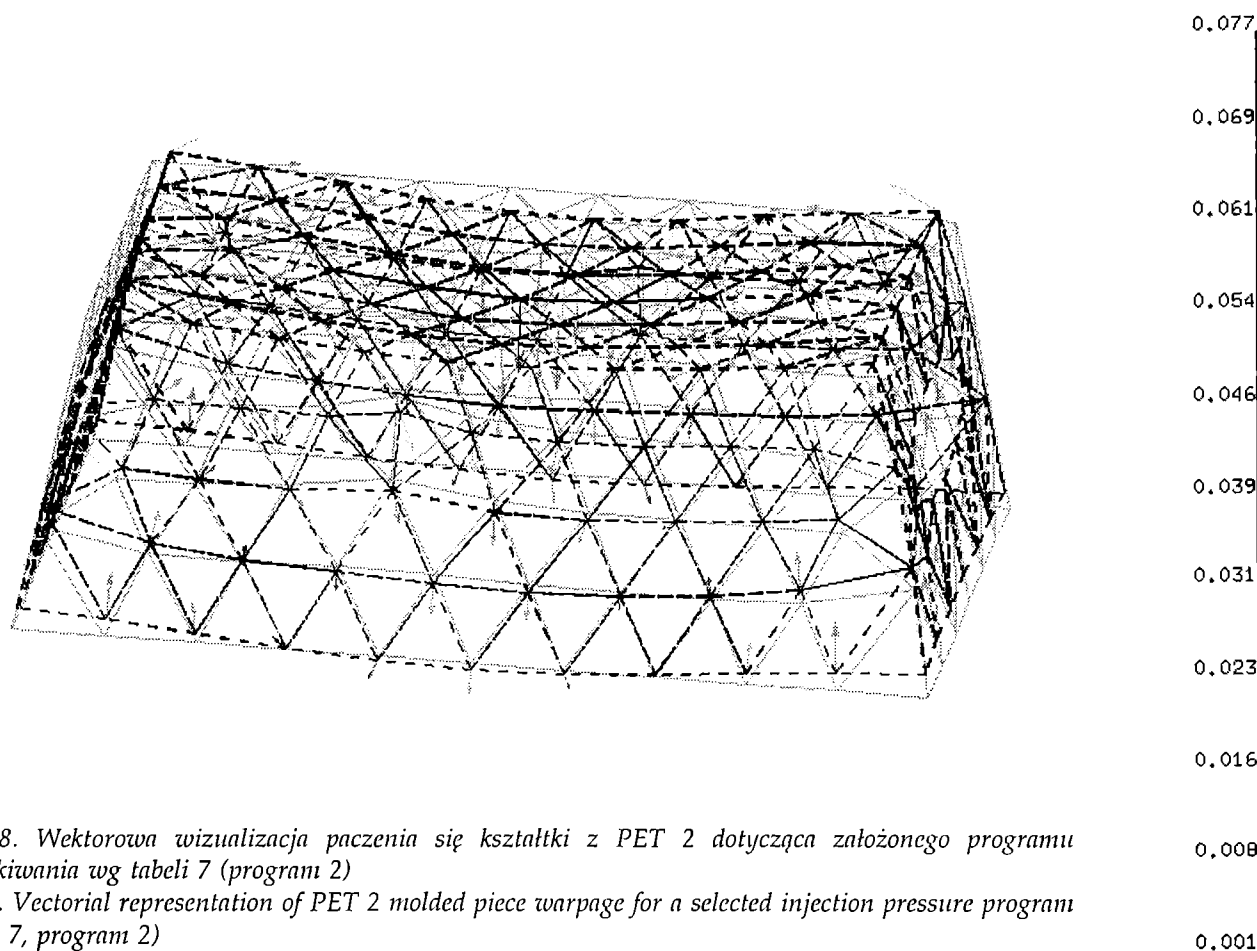
Rys. 6. Wektorowa wizualizacja paczenia się kształtki z PP 2 dotycząca założonego programu wtryskiwania (tabela 5, program 3)

Fig. 6. Vectorial representation of PP2 molded piece warpage for a selected injection pressure program (Table 5, program 3)



Rys. 7. Wektorowa wizualizacja paczenia się kształtki z PE 2 dotycząca założonego programu wtryskiwania (tabela 6, program 2)

Fig. 7. Vectorial representation of PE2 molded piece warpage for a selected injection pressure program (Table 6, program 2)



Rys. 8. Wektorowa wizualizacja paczenia się kształtki z PET 2 dotycząca założonego programu wtryskiwania wg tabeli 7 (program 2)

Fig. 8. Vectorial representation of PET 2 molded piece warpage for a selected injection pressure program (Table 7, program 2)

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionej analizy wtryskiwania trzech polimerów, których charakterystykę modyfikowano w celu symulacji zmian ich właściwości przetwórczych zachodzących podczas wielokrotnego przetwórstwa, można stwierdzić, że:

— W wyniku zmniejszenia lepkości spowodowanej kilkukrotnym przetwórstwem PP następuje nieznaczna poprawa łatwości wypełniania gniazda formującego, natomiast w przypadku PET wzmocnionego włóknem szklanym poprawa ta jest niemal niezauważalna.

— Recyklat z PE, którego lepkość w niewielkim stopniu różnie wskutek kilkukrotnego przetwórstwa, nieco trudniej wypełnia gniazdo formujące.

— Zwiększenie współczynnika rozszerzalności cieplnej tworzywa, zastosowane jako miara jego rosnącego wskutek wielokrotnego przetwórstwa skurczu, powodowało przyrost wyznaczonej metodą symulacji komputerowej powtryskowej deformacji kształtek.

— Powtryskową deformację wyprasek można zmniejszyć stosując zaproponowane w niniejszej pracy programowane ciśnienie w fazie docisku, którego cechą jest to, że początkowo (w ciągu 2 s) ciśnienie to jest równe ciśnieniu w fazie wypełniania, a potem gwałtownie maleje. Natomiast programowanie ciśnienia w fazie wypełniania, bez zalecanej modyfikacji ciśnienia docisku, niewiele tu pomaga.

Autor dziękuje Panom dr. inż. Stefanowi Dzielendziakowi i mgr. inż. Grzegorzowi Jabłońskiemu z firmy Centrum Komputerowe z Wrocławia za współpracę we wdrażaniu i podtrzymaniu systemu „I-DEAS MS™” w Politechnice Rzeszowskiej.

LITERATURA

1. Kircher K.: „Chemical Reactions in Plastics Processing”, Hanser Publ., Monachium 1987.
2. Pakhareno V. A. i in.: *Plasticheskie Massy* 1990, nr 12, 57.
3. Heneczowski M.: *Polimery* 1993, 38, 123.
4. Heneczowski M.: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 1995, 13, nr 136, 83.
5. Heneczowski M., Fabrycy E.: „Kompozyty i kompozycje polimerowe”, Szczecin 1997, Mat. Konf., str. 229.
6. Heneczowski M.: *Materiały Zjazdu Naukowego PTChem-SITPChem*, Rzeszów 1999, str. 107.
7. Heneczowski M.: *World Polymer Congress IU-PAC Macro 2000*, Warszawa 2000, str. 634.
8. Chen B. S., Liu W. H.: *Polym. Eng. Sci.* 1994, 34, 835.
9. Wang T. J. i in.: *Int. Polym. Process* 1995, 10, nr 1, 82.
10. Chang R. Y., Tsaur B. D.: *Polym. Eng. Sci.* 1995, 35, 1222.
11. Chang R. Y., Chiou S. Y.: *Polym. Eng. Sci.* 1995, 35, 1733.
12. Zheng R. i in.: *J. Thermopl. Compos. Mat.* 1996, 9, nr 1, 90.
13. Liu S. J.: *Polym. Eng. Sci.* 1996, 36, 807.
14. Kikuchi H., Koyama K.: *Polym. Eng. Sci.* 1996, 36, 1309.
15. Kikuchi H., Koyama K.: *Polym. Eng. Sci.* 1996, 36, 1326.
16. Akay M. i in.: *Polym. Eng. Sci.* 1996, 36, 1839.
17. Glaser S.: *Kunststoffe* 1998, 88, nr 3, 395.
18. Sheng Q., Farshad F. F., Shangyu D.: *Eng. Computations* 1999, 16, 892.
19. Michaeli W., Niggemeier P.: *Kunststoffe* 1999, 89, nr 6, 70.
20. Heneczowski M., Jabłoński G.: *Polimery* 1996, 41, 463 i 592.
21. Ehrenstein G. W.: „Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften”, C. Hanser Verlag, Monachium 1992.

Rapid Communications

Przypominamy P.T. Autorom, że prowadzimy w naszym czasopiśmie dział typu **Rapid Communications**. Publikujemy w nim, wyłącznie w języku angielskim, krótkie (3—4 strony maszynopisu i ewentualnie 2—3 rysunki lub tabele) **prace oryginalne**, którym gwarantujemy szybką ścieżkę druku, co oznacza, że pojawiają się one w czasopiśmie w okresie nieprzekraczającym 5 miesięcy od chwili ich otrzymania przez redakcję.