

BEATA KOWALSKA

Politechnika Lubelska
Katedra Procesów Polimerowych
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: beatak@fenix.pol.lublin.pl

Skurcz wtryskowy a zależność $p-v-T$

Streszczenie — Przedstawiono obliczenia symulacyjne skurczu objętościowego (S_v) i odkształcenia wyprasek z polipropylenu izotaktycznego „Malen P” typ J-400 uzyskanych w procesie wtryskiwania. Wykorzystano zależności pomiędzy ciśnieniem, objętością właściwą a temperaturą ($p-v-T$) otrzymane w różnych warunkach ochładzania polimeru. Symulację przepływu w formie wtryskowej oraz skurczu objętościowego i odkształcenia wyprasek uzyskiwanych z zastosowaniem rozmaitych parametrów procesu wtryskiwania przeprowadzono za pomocą programu „Moldflow Plastics Insight ver. 4.1”. Do aproksymacji danych $p-v-T$ przyjęto 7-parametrowy model reologiczny Crossa-WLF (tabela 1) oraz termodynamiczne równanie stanu Taita. Przedstawione wartości skurczu oraz odkształcenia wypraski odnoszące się do różnych szybkości ochładzania polimeru znacznie różnią się między sobą — różnice dochodzą do 35 %. Świadczy to o istotnym wpływie charakteru zależności $p-v-T$ wykorzystywanych do symulacji procesu.

Słowa kluczowe: proces wtryskiwania, obliczenia symulacyjne, zależność $p-v-T$, równanie Taita, skurcz objętościowy, odkształcenie przetwórcze.

INJECTION MOLDING CONTRACTION AND $p-v-T$ RELATION

Summary — Simulation calculations of contraction in volume (S_v) and strain of moldings made of isotactic polypropylene “Malen P” type J-400 prepared by injection molding, were presented (Fig. 1, 2). Relations between pressure, specific volume and temperature ($p-v-T$) obtained in various conditions of polymer cooling were applied. The simulations of the flow in the mold as well as of the contraction in volume and strain of molding were done with use of the program “Moldflow Plastics Insight ver. 4.1”. Rheological 7-parameter Cross-WLF model and thermodynamic Tait’s state equation were used for $p-v-T$ data approximation (Table 1—2). The values of contraction and strain of moldings (Fig. 3—6), relating to various cooling rates, differ significantly. The differences reach 35 %. It confirms the significant influence of $p-v-T$ data used in the process simulation.

Key words: injection molding process, simulation calculations, $p-v-T$ relation, Tait’s equation, contraction in volume, strain.

Ciepłny skurcz przetwórczy jest miarą zmiany objętości i kształtu wypraski podczas jej ochładzania w procesie wtryskiwania. Rozróżnia się przy tym skurcz objętościowy i skurcz liniowy [1—3], a wartość każdego z nich nie jest jednakowa we wszystkich miejscach wytworu. Na jej zróżnicowanie wpływa przede wszystkim nierównomiernie zmniejszająca się temperatura polimeru w toku ochładzania; jest to spowodowane m.in. małą, zmieniającą się ze spadkiem temperatury przewodnością cieplną oraz dużą i również podlegającą w tych warunkach zmianie rozszerzalnością cieplną polimeru [1, 2]. W rezultacie, w wyprawce powstaje znaczny i różnorodny przestrzennie gradient szybkości ochładzania, dzięki któremu tworząca się struktura polimeru staje się w różnym stopniu heterogeniczna i anizotropowa.

W analizie skurczu objętościowego jest pomocna umiejętność interpretacji wykresów $p-v-T$ obrazujących przebieg procesu wtryskiwania, albowiem zmiany obję-

tości właściwej tworzywa dotyczą większości faz tego procesu [1—4]. Mianowicie, podczas fazy wtrysku następuje gwałtowne zmniejszenie objętości właściwej ciekłego polimeru spowodowane jego ściśliwością. W fazie docisku, w warunkach izobarycznego ochładzania, zmniejsza się objętość polimeru w gnieździe. Natomiast w fazie ochładzania poszczególne warstwy — ulegające zestaleniu z różną szybkością i pod niejednakowym ciśnieniem — charakteryzują się w chwili zestalenia różną objętością właściwą. Tego typu zróżnicowanie jest tym większe, im jest grubsza wyprawka. Tak więc po przejściu polimeru w stan stały w warunkach ciśnienia atmosferycznego zmienia się kształt i zmniejsza się objętość wypraski, a poszczególne warstwy kurczącego się polimeru mają odmienną objętość właściwą.

Niedostateczne poznanie stanu termodynamicznego polimeru opisywanego przez zależności $p-v-T$ (zwłaszcza w odniesieniu do polimerów częściowo krystalicz-

nych) bądź też przyjęcie zbyt dużych uproszczeń w obliczeniach symulacyjnych to przyczyny mniejszej efektywności procesu jak również tego, że wypraski nie spełniają założonego kryterium jakościowego. Zatem, wykorzystując te zależności w procesie wtryskiwania należy określić parametry kinetyczne krystalizacji w warunkach, w których przebiega proces. Pozwala to na uwzględnienie zarówno różnic w wartościach temperatury przemiany fazowej, jak i zmian objętości właściwej polimeru w stanie stałym.

Poprawna analiza zależności p - v - T i ich pochodnych jest także niezbędnym narzędziem w nowoczesnej symulacji komputerowej, zwłaszcza faz docisku i ochładzania wypraski w procesie wtryskiwania. Zmienne wartości objętości właściwej stanowią również wejściowe dane w symulacjach numerycznych stosowanych w projektowaniu form wtryskowych. Poznanie zachodzących w funkcji czasu zmian właściwości przetwarzanego polimeru pozwala na istotne przyspieszenie prac optymalizacyjnych i projektowych a także na zwiększenie skuteczności sterowania procesem [5–8].

Procedury obliczeniowe stosowane w programach symulacyjnych wymagają wprowadzenia do programu określonych danych. Są to m.in. parametry modelu reologicznego oraz termodynamicznego równania stanu polimeru. Najistotniejszymi z nich są współczynniki rozszerzalności cieplnej oraz ściśliwości.

Głównym celem badań symulacyjnych stanowiących przedmiot referowanej poniżej pracy było porównanie wartości skurczu objętościowego wyprasek oraz ich odkształcenia, uzyskanych z wykorzystaniem zależności p - v - T odpowiadających warunkom powolnego i szybkiego ochładzania polimeru z zachowaniem jednakowych pozostałych warunków wtryskiwania.

PODSTAWY I ZAŁOŻENIA MODELOWANIA PROCESU WTRYSKIWANIA

Symulację przepływu w formie wtryskowej oraz skurczu objętościowego i odkształcenia wyprasek przeprowadzono za pomocą programu „Moldflow Plastics Insight ver. 4.1.” [9, 10], będącego w dyspozycji Katedry Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją Politechniki Częstochowskiej. Program ten stanowi integralną część pakietu oprogramowania firmy SERC o nazwie „I-Deas Master Series 8”, a jego modułowa budowa pozwala na formowanie określonych konfiguracji systemu w zależności od realizowanych zadań.

Przeprowadzenie symulacji wymaga wprowadzenia do programu obliczeniowego danych dotyczących kształtu i wymiarów wypraski, elementów konstrukcyjnych formy wtryskowej, właściwości przetwarzanego polimeru, warunków wtryskiwania oraz typu wtryskarci. Podstawą modelowania procesu wtryskiwania jest założenie, że przepływ polimeru w kanałach formy wtryskowej stanowi przepływ lokalnie dwuwymiarowy [11–13]. Założenie to jest zasadne, gdyż wypraski są

zazwyczaj wytworami cienkościennymi, co pozwala na zaniechanie przepływu w kierunku grubości wypraski. Ponadto przyjmuje się, że polimer w stanie ciekłym zachowuje się jak uogólniony płyn newtonowski.

Podstawowe równania jakie należy rozwiązać to równania zachowania masy (równanie ciągłości), zachowania ruchu oraz zachowania energii. Rozwiązanie tego rodzaju występujących w postaci ogólnej równań odnoszących się do procesów tak złożonych jak wtryskiwanie nie jest możliwe, dlatego też należy poczynić szereg założeń upraszczających. Dotyczą one zarówno właściwości polimeru, jak i obszaru stosowalności równania. Uproszczeń takich można dokonać przyjmując parametry kształtu gniazda formy wtryskowej a także rozgraniczając rozważania dotyczące gniazda formującego i kanałów przepływowych. Kolejnym krokiem jest wprowadzenie tzw. temperatury ustania przepływu (ang. *no-flow temperature*), rozumianej jako temperatura, w której polimer zachowuje się jak ciało stałe. Takie zdefiniowanie temperatury pozwala na zastosowanie w symulacji równań podstawowych, wyprowadzonych dla płynu, nie odnoszących się więc do warstw zestalonych. Przyjmuje się wówczas, że składowe prędkości polimeru zestalonego przy ściankach gniazda przybierają wartości równe zero. Ponadto zakłada się, że przepływ polimeru jest symetryczny względem powierzchni środkowej gniazda formującego.

Szczegółowe dane dotyczące postaci równań podstawowych, sposób ich rozwiązywania, a także analiza założeń upraszczających są opisane w literaturze [11, 13–20].

W badaniach symulacyjnych do obliczeń rozkładu ciśnienia zastosowano metodę elementów skończonych, do obliczeń rozkładu temperatury — metodę różnic skończonych a do określenia przebiegu frontu przepływającego polimeru metodę objętości kontrolnej (ang. *control volume*) [21–23].

Do przeprowadzenia symulacji jest niezbędne przyjęcie dodatkowo, oprócz równań podstawowych, reologicznego równania stanu polimeru, określającego zależność pomiędzy lepkością polimeru (η) a szybkością ścinania ($\dot{\gamma}$). Spośród wielu znanych matematycznych modeli reologicznych [11, 24–27] wybrano do badań 7-parametrowy model reologiczny Crossa-WLF, będący połączeniem modelu Crossa i modelu WLF, który jak wiadomo [28–30], zapewnia stosunkowo dokładny opis matematyczny właściwości reologicznych polimeru. W bazie danych programu „Moldflow Plastics Insight” można znaleźć wartości parametrów tego modelu, odpowiadające warunkom prowadzonej symulacji.

Model Crossa ma następującą postać [28–31]:

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (1)$$

gdzie: T — temperatura, p — ciśnienie, n oraz τ^* — stałe parametry modelu (τ^* oznacza naprężenie styczne, pod wpływem

wem którego polimer ciekły zaczyna wykazywać właściwości płynu rozrzedzanego ścinaniem), η_0 — lepkość w warunkach szybkości ścinania dążącej do zera.

Zmiany η_0 w funkcji temperatury można opisać za pomocą modelu WLF:

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right] \quad (2)$$

w którym

$$T^*(p) = D_2 + D_3 p \quad (3)$$

oraz

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (4)$$

gdzie: $D_1, D_2, D_3, A_1, \tilde{A}_2$ — parametry stałe modelu WLF.

Parametry te, wraz ze stałymi modelu Crossa, wchodzi w skład 7-parametrowego modelu Crossa-WLF. Ich wartości odniesione do warunków przeprowadzanej symulacji określono na podstawie bazy danych programu (tabela 1).

T a b e l a 1. Wartość parametrów modelu Crossa-WLF

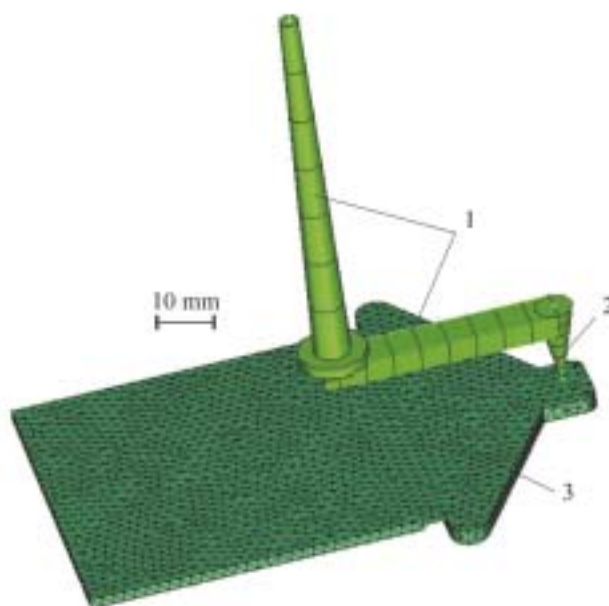
T a b l e 1. Values of Cross-WLF model parameters

Para- metr	N	τ^* Pa	D_1 Pa · s	D_2 K	D_3 K/Pa	A_1	A_2 K
Wartość	0,1695	75142	$3,19 \cdot 10^{12}$	263,15	0	28,687	51,6

Do symulacji fazy docisku a także w celu określenia skurczu objętościowego oraz odkształcenia wyprasek niezbędne jest poznanie zależności p - v - T [32, 33].

W obliczeniach wykorzystano opisane w literaturze [30, 34—37] doświadczalne równanie Taita — oddzielnie w odniesieniu do stanu stałego i stanu ciekłego polimeru. Parametry równania Taita w toku powolnego oraz szybkiego ochładzania polipropylenu izotaktycznego „Malen P” typ J-400, produkowanego przez firmę Basell Orlen Polyolefins, wyznaczono w publikacji [37]. Wyniki te posłużyły w niniejszej pracy do obliczenia skurczu oraz odkształcenia wypraski wykonanej z tego właśnie polimeru; jego charakterystykę (dane producenta) także zawiera publikacja [37].

Model bryłowy wypraski zbudowano za pomocą modułu „Master Modeler” pakietu „I-Deas Ms8”, a jego



Rys. 1. Siatka elementów skończonych kanału centralnego i doprowadzającego (1), polimeru zestalonego w przewężce (2) oraz próbki pomiarowej (3)

Fig. 1. Finite element net of central channel and runner (1), polymer solidified in a gate (2) and measurement sample (3)

podział na elementy skończone — przy użyciu modułu „Mesh” wspomnianego pakietu. Tak skonstruowany model obejmuje wlewek (elementy ukształtowane w kanale centralnym, kanałach doprowadzających i przewężce) oraz próbkę pomiarową.

Model podzielono na 34 293 czworościenne (3D) elementy skończone próbki pomiarowej oraz na 81 linowych (1D) elementów wlewka i polimeru zestalonego w przewężce (rys. 1).

Z bazy danych dotyczącej maszyn przetwórczych wybrano wtryskarkę KM 65/160/C1 firmy Krauss Maffei. Sterowanie komputerowe tej wtryskarki umożliwia dokładne ustalenie warunków wtryskiwania oraz kontrolę przebiegu poszczególnych faz procesu.

W symulacji zastosowano dane dotyczące warunków wtryskiwania wyprasek dobrane na podstawie literatury [2, 3, 38] (tabela 2).

Wykorzystane zależności p - v - T otrzymano opierając się na uprzednio przedstawionych obliczeniach [37, 39].

T a b e l a 2. Warunki procesu wtryskiwania przyjęte w przeprowadzonej symulacji

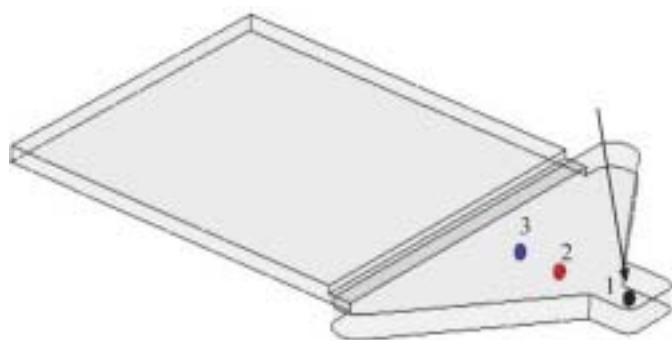
T a b l e 2. Injection molding conditions taken to the simulation done

Symbol próbki	Ciśnienie docisku (p_d), MPa	Prędkość wtryskiwania v_w , m/s	Czas (s)			Temperatura cylindra T (°C) w strefie:			
			wtryski- wania, t_w	docisku t_d	ochładzania t_{ch}	I	II	III	IV
1	30	0,02	1,83	15	20	210	215	220	230
5.1		0,12	0,36						
21.1	60	0,02	1,83						
25.1		0,12	0,36						

Zastosowano szybkość ochładzania 5 °C/min oraz warunki szybkiego ochładzania z uwzględnieniem kinetyki krystalizacji.

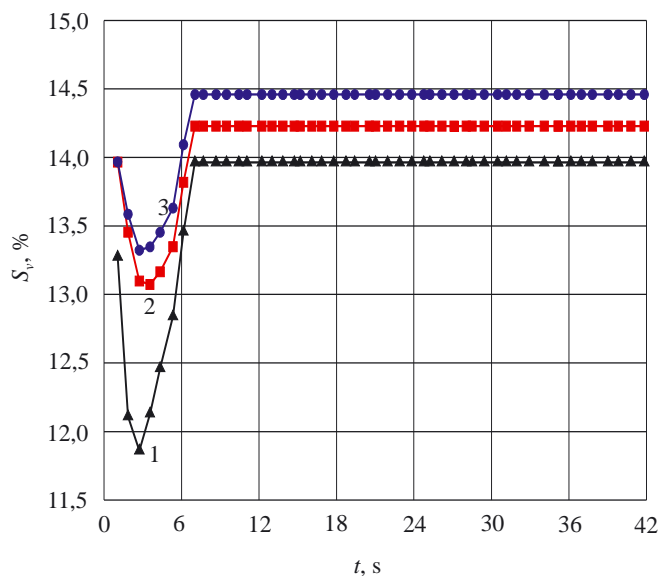
WYNIKI SYMULACJI

Zmiany skurczu objętościowego (S_v) w funkcji czasu określono w wybranych węzłowych punktach wypraski zaznaczonych na rys. 2. Analiza ochładzania dotyczyła środkowej warstwy polimeru.



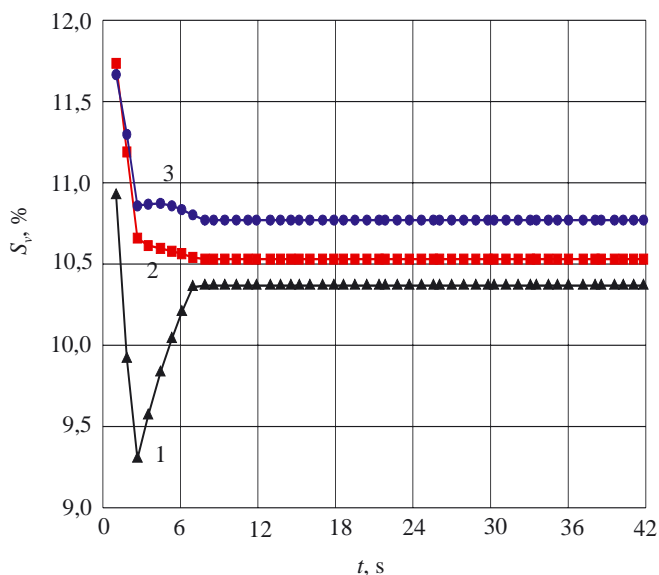
Rys. 2. Wygląd wypraski z PP z zaznaczonym kierunkiem dopływu polimeru do przewężki. Wyodrębniono punkty węzłowe (1, 2, 3), w których określono krzywe ochładzania

Fig. 2. Look of PP sample with marked direction of polymer inlet into the gate. Nodal points (1, 2, 3) are isolated, in which the cooling curves were simulated



Rys. 3. Zależność skurczu objętościowego (S_v) od czasu (t) określona w wybranych węzłach (1, 2 i 3 — por. rys. 2) wypraski z PP (tabela 2, symbol 25.1) z wykorzystaniem parametrów równania Taita w warunkach powolnego ochładzania polimeru

Fig. 3. Time (t) dependence of contraction in volume (S_v) in selected points (1, 2, 3 — see Fig. 2) of PP molding (symbol 25.1 in Table 2), obtained with Tait's equation parameters applied, at slow cooling of a polymer



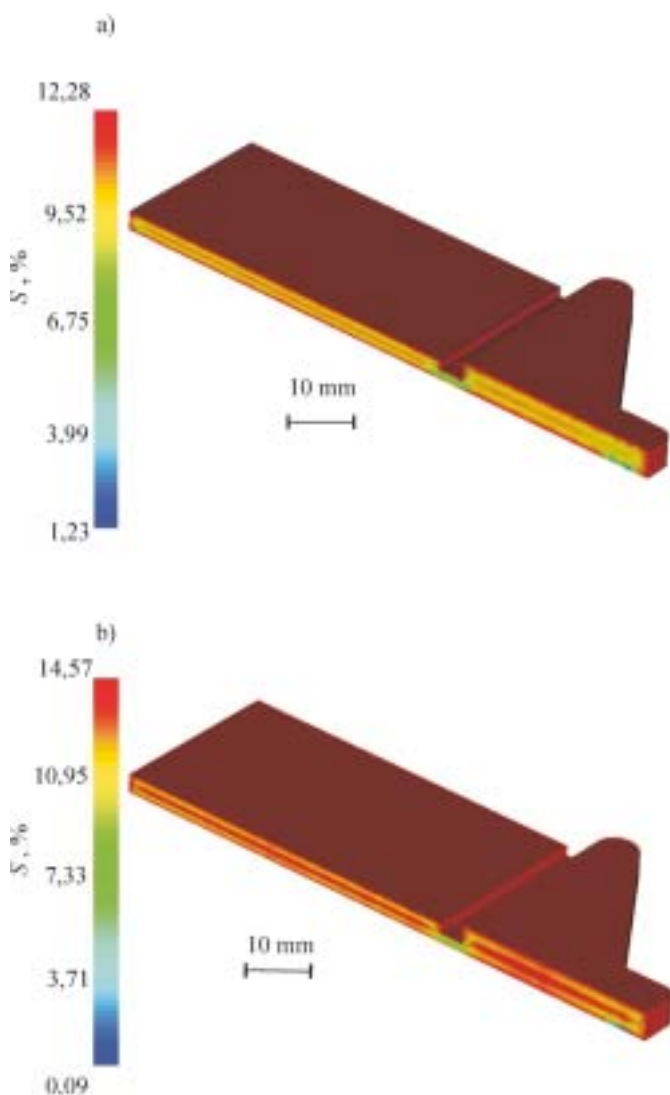
Rys. 4. Zależność skurczu objętościowego (S_v) od czasu (t) określona w wybranych węzłach (1, 2 i 3 — por. rys. 2) wypraski z PP (por. rys. 3) z wykorzystaniem parametrów równania Taita określonych w warunkach szybkiego ochładzania polimeru

Fig. 4. Time (t) dependence of contraction in volume (S_v) in selected points (1, 2, 3 — see Fig. 2) of PP molding (symbol 25.1 in Table 2), obtained with Tait's equation parameters applied, at fast cooling of a polymer

Wartości skurczu przedstawione na rys. 3 odpowiadają parametrom modelu Taita wyznaczonym w warunkach powolnego ochładzania polimeru, natomiast wartości skurczu pokazane na rys. 4 zostały otrzymane na podstawie skorygowanych wartości parametrów modelu Taita, odpowiadających szybkiemu ochładzaniu [37]

Na rysunkach tych obserwuje się początkowy gwałtowny spadek wartości S_v , a następnie jej wzrost i stabilizację na określonym poziomie. Największe różnice wartości S_v dotyczą punktu 1 położonego najbliżej wlotu polimeru do gniazda formującego. Może to być spowodowane przepływem wstecznym ciekłego polimeru, następującym po przełączeniu na ciśnienie docisku uniemożliwiające wzrost S_v . Również oddziaływanie polimeru ze ścianką gniazda formy w postaci tarcia oraz adhezji (poprzedzonej absorpcją) może działać hamująco na wzrost wartości skurczu. Po osiągnięciu równowagi, czyli w chwili, w której kurczenie polimeru przestaje występować zakłócenia, rozpoczyna się jego skurcz objętościowy. Niejednakowe w poszczególnych punktach wypraski wartości ciśnienia i temperatury a także różne ich zmiany w czasie powodują, że skurcz określany w tych punktach nie jest taki sam [40].

Z analizy rys. 3 i 4 wynika, że wartości S_v uzyskane w warunkach odmiennych szybkości ochładzania różnią się w istotny sposób między sobą. W przypadku szybkiego ochładzania wypraski (rys. 4) najmniejszy skurcz objętościowy po zakończonym procesie wtryskiwania wynosi 10,4 % i dotyczy punktu nr 1 (por. rys. 2),

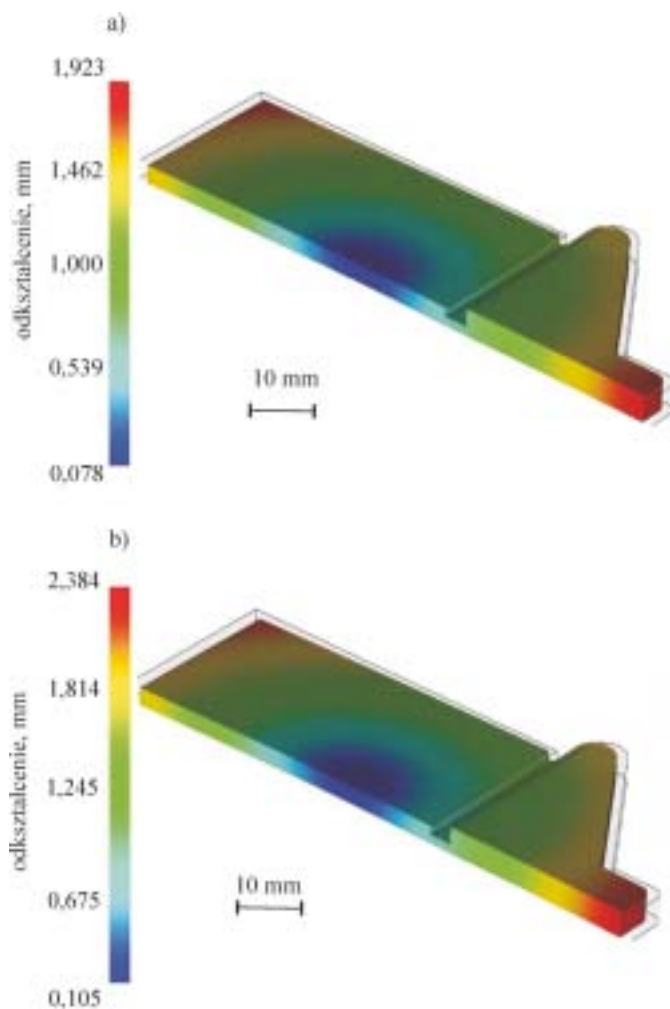


Rys. 5. Rozkład skurczu objętościowego (S_v , skala kolorystyczna) w wyprasce z PP (por. rys. 3) uzyskany z wykorzystaniem parametrów równania Taita określonych w warunkach: a) szybkiego ochładzania polimeru, b) powolnego ochładzania polimeru

Fig. 5. Contraction in volume (S_v , coloristic scale) distribution in PP molding (symbol 25.1 in Table 2), obtained with Tait's equation parameters applied, at: a) fast cooling of a polymer, b) slow cooling of a polymer

natomiast największą wartość S_v , równą 10,8 %, zaobserwowano w węźle nr 3. Wartości te są znacznie mniejsze niż uzyskane z zastosowaniem parametrów równania Taita dotyczącego ochładzania powolnego, gdzie odpowiednio minimalny S_v (nr 1) = 13,9 % a maksymalny S_v (nr 3) = 14,4 %.

Tak więc skurcz objętościowy uzyskany w warunkach odpowiadających rzeczywistemu przebiegowi procesu (szybszemu ochładzaniu) jest mniejszy niż w przypadku powolnego ochładzania polimeru (względne różnice wartości sięgają 35 %); ponadto także nierównomierność rozkładu skurczu w poszczególnych warstwach polimeru oraz jego zmiany w początkowym ok-



Rys. 6. Odkształcenie wypraski z PP (por. rys. 3) uzyskane z wykorzystaniem parametrów równania Taita określonych w warunkach: a) szybkiego ochładzania polimeru, b) powolnego ochładzania polimeru

Fig. 6. Strain of PP molding (symbol 25.1 in Table 2), obtained with Tait's equation parameters applied, at: a) fast cooling of a polymer, b) slow cooling of a polymer

resie fazy docisku są bardziej widoczne w warunkach szybkiego ochładzania.

W celu zobrazowania rozkładu skurczu w całej objętości wypraski wykonano symulacje, w wyniku których uzyskano wartości S_v przedstawione na rys. 5.

W tym przypadku również analizowano warunki szybkiego (rys. 5a) oraz powolnego ochładzania wypraski (rys. 5b). W obydwu rozpatrywanych wariantach występują różnice w rozkładzie oraz wartościach skurczu w poszczególnych miejscach każdej z wyprasek, przy czym zmienność skurczu jest widoczna zarówno na powierzchni, jak i na grubości wypraski. Odkształcenie wypraski będące skutkiem przedstawionego rozkładu skurczu ilustruje rys. 6. W tym przypadku pokazano także rozkład odkształceń na grubości oraz na całej powierzchni wypraski. W warunkach szybkiego ochładzania polimeru odkształcenia są więc mniejsze niż w wa-

runkach powolnego ochładzania, co całkowicie potwierdza poprzednio omówione spostrzeżenia.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że przyjęte do obliczeń różne parametry termodynamicznego równania stanu Taita wpływają na uzyskiwaną wartość skurczu objętościowego wyprasek wtryskowych. Parametry te, określone na podstawie standardowych pomiarów p - v - T , czyli w warunkach powolnego ochładzania polimeru powodują, że wartości skurczu objętościowego są większe niż w przypadku ochładzania szybkiego, a różnice dochodzą nawet do 35 %. Odkształcenie wypraski zależy od szybkości ochładzania w podobny sposób.

Wyniki uzyskane w rozmaitych warstwach wypraski także różnią się między sobą. Jest to skutkiem zróżnicowanego gradientu prędkości ochładzania polimeru oraz tego, że poszczególne warstwy wypraski zestalają się pod innym rzeczywistym ciśnieniem, co prowadzi do powstawania naprężeń własnych w polimerze.

Podczas szybkiego ochładzania polimeru czas na ukonstytuowanie się w pełni rozwiniętej struktury krystalicznej jest zbyt krótki, dlatego obserwuje się mniejszy skurcz objętościowy, niż w przypadku ochładzania powolnego. Jest to jednak zjawisko niekorzystne, ponieważ w wyniku zachodzenia dalszych przemian strukturalnych w polimerze częściowo krystalicznym następuje zwiększony skurcz wtórny wyprasek.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przyjęte warunki ustalania zależności p - v - T w istotny sposób wpływają na obliczane wartości skurczu objętościowego i odkształcenia wyprasek poliptylenowych. Zatem parametry równania stanu należy określać w warunkach szybkiego ochładzania polimeru, charakterystycznych dla procesu wtryskiwania.

LITERATURA

- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993.
- Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989.
- Zawistowski H.: „Teoria kształtowania właściwości wyrobów w procesie wtryskiwania” w pracy zbiorowej „Stosowanie i przetwórstwo materiałów polimerowych” (red. Koszkuł J.), Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998, str. 109.
- Guo X., Isayev A. I.: *Int. Polym. Process.* 1999, **14**, 377 i 387.
- Guo X., Isayev I., Demiray M.: *Polym. Eng. Sci.* 1999, **39**, 2096 i 2132.
- Guo J., Narh K. A.: *Polym. Eng. Sci.* 2001, **41**, 1996.
- Kamal M. R., Lafleur P. G.: *Polym. Eng. Sci.* 1982, **22**, 1066.
- „C-Mold Design Guide. A Resource for Plastics Engineers”, C-Mold Ithaca, New York 1998.
- „C-Mold Reference Manual”, C-Mold Ithaca, New York 1997.
- Kennedy P.: „Flow Analysis of Injection Molds”, Hanser Publishers, Munich-Vienna-New York 1995.
- Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
- Tucker L. Ch.: „Fundamentals of computer modeling for polymer processing”, Carl Hanser Verlag, Munich-Vienna-New York 1989.
- Alexandrou A. N., Ahmed A.: *Polym. Eng. Sci.* 1993, **33**, 1055.
- Buchmann M., Theriault R., Osswald T. A.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 667.
- Chen B. S., Liu W. H.: *Polym. Eng. Sci.* 1994, **34**, 835.
- Kamal M. R., Kenig S.: *Polym. Eng. Sci.* 1972, **12**, 294 i 302.
- Kamal M. R., Lafleur P. G.: *Polym. Eng. Sci.* 1982, **22**, 1066.
- Michaeli W., Hoffmann S., Kratz M., Webelhaus K.: *Int. Polym. Process.* 2001, **16**, 398.
- Papathanasiou T. D., Kamal M. R.: *Polym. Eng. Sci.* 1993, **33**, 400.
- Greene J. P.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 590.
- Koszkuł J., Nabiałek J., Koszkuł M.: „Symulacja wypełnienia gniazda formy wtryskowej z wykorzystaniem programu Moldflow Plastic Insight” w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo” (red. Koszkuł J.), Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000, str. 203.
- Lee Ho-S.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 559.
- Carreau P. J., De Kee D. C. R., Chhabra R. P.: „Rheology of Polymeric Systems. Principles and Applications”, Hanser Publishers, Munich-Vienna-New York 1997.
- De Kee D., Chan Man Fong C. F., Sun N.: „Useful Rheological Models for Industrial Applications”, mat. konf. „The Polymer Processing Society, 15th European Meeting”, s’ Hertogenbosch 1999, str. 151.
- Ferguson J., Kembłowski Z.: „Reologia stosowana płynów”, Wyd. Marcus, Łódź 1995.
- Verhoyen O., Dupret F.: *J. Non-newtonian Fluid Mech.* 1998, **74**, 25.
- Liyong Yu L., Lee J., Koelling K. W.: *Polym. Eng. Sci.* 2004, **44**, 1866.
- Jansen K. M. B., van Dijk D. J., Keizer K. P.: *Int. Polym. Process.* 1998, **13**, 417.
- Chiang H. H., Hieber C. A., Wang K. K.: *Polym. Eng. Sci.* 1991, **31**, 116 i 125.
- Yu L., Lee L. J., Koelling K. W.: *Polym. Eng. Sci.* 2004, **44**, 1866.
- Michaeli W., Niggemeier P.: *Kunststoffe Plast Europe* 1999, **89**, 17.
- Tanguy P. A., Grygiel J. M.: *Polym. Eng. Sci.* 1993, **33**, 1229.
- Han S., Wang K. K.: *Int. Polym. Process.* 1997, **12**, 228.
- Han S., Wang K. K.: *Int. Polym. Process.* 2002, **17**, 67.
- Kowalska B., Sikora R.: *Polimery* 2003, **48**, 359.
- Kowalska B.: *Polimery* 2006, **51**, 862.
- Zawistowski Z., Zięba S.: „Ustawianie procesu wtrysku”, Plastech, Warszawa 1995.
- Kowalska B.: *Polimery* 2007, **52**, nr 2.
- Postawa P.: *Polimery* 2005, **50**, 201.