

PRZEMYSŁAW POSTAWA

Politechnika Częstochowska

Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją

Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa

e-mail: postawa@kpts.pcz.czest.pl

## Skurcz przetwórczy wyprasek a warunki wtryskiwania<sup>\*)</sup>

### SHRINKAGE OF MOLDINGS AND INJECTION MOLDING CONDITIONS

**Summary** — Results of experiments focused on assessment, in injection molding, of the effects of independent variables (input parameters) on dependent variables: longitudinal shrinkage ( $S_w$ ), perpendicular shrinkage ( $S_p$ ) (Fig. 2 and 3) and weights ( $m$ ) of the moldings made of semi-crystalline polyoxymethylene (POM) or amorphous polystyrene (PS) were presented. Experiment design consisted of 27 systems investigated and 5 input parameters: mold temperature ( $T_f$ ), injection temperature ( $T_i$ ), clamping pressure ( $p_d$ ), cooling time ( $t_{ch}$ ) and injection speed ( $v_w$ ) (Table 2 and 3). Diversification of values of perpendicular shrinkage along the way of plastic flow in mold cavity (Fig. 4) has been found. Statistic analysis of the results based on estimation of parameters of regression equations (2) describing the variability of dependent values investigated as the functions of independent variables (Table 6). Analysis of correlation was done as well and the results were presented in the form of matrix of correlation (Table 4 and 5). It results from the data presented that with the aim to control the shrinkage value and molding weight in the industrial practice it is most advantageous to change the clamping pressure as essential easy-to-change parameter.

**Key words:** injection molding, polyoxymethylene, polystyrene, molding shrinkage, processing conditions, statistic analysis.

Warunki wtryskiwania, które są wynikiem działania wielu czynników związanych z wtryskarką, formą, wtryskiwanym tworzywem i przyjętymi parametrami procesu, wpływają na stan fizyczny oraz strukturę wypraski. To z kolei decyduje m.in. o jej właściwościach mechanicznych, cieplnych i użytkowych [1–8].

Prowadzi się wiele zaawansowanych badań mających na celu polepszenie i utrzymywanie na jednokowym poziomie jakości uzyskiwanych wytworów oraz opracowanie nowych, bardziej precyzyjnych układów sterowania maszynami przetwórczymi. Tematyką sterowania, a także wykorzystywania technik doświadczalnych w modelowaniu procesu wtryskiwania przebiegającego we wtryskarkach ślimakowych zajmuje się zespół kierowany przez S. Płaskę [9–12].

Z danych literaturowych [1, 5, 13–18] wynika, że wartość skurczu przetwórczego zależy od wielu czynników związanych zarówno z samym procesem przetwórczym,

jak i z kształtem wypraski oraz rodzajem tworzywa z którego została wykonana.

Podczas przepływu tworzywa następuje spadek ciśnienia spowodowany zwiększaniem się oporów przepływu [2–4]. W zależności od przyjętych warunków przetwórstwa w różnych miejscach wypraski występują rozmaite wartości ciśnienia, które zależą od kształtu oraz sposobu chłodzenia wypraski. Prowadzi to do odmiennych warunków krystalizacji w tych obszarach tworzywa, co w efekcie powoduje występowanie różnego skurczu przetwórczego wzdłużnego oraz poprzecznego.

Istotny czynnik w rozważanym procesie stanowi wartość ciśnienia docisku, która wywiera znaczny wpływ na stopień upakowania, a więc i na gęstość tworzywa.

W artykule przedstawiono wyniki badań zmiany skurczu przetwórczego oraz masy wypraski w różnych warunkach przetwórstwa. Celem tych badań było określenie wpływu wybranych parametrów wejściowych (warunków wtryskiwania) na wielkości wyjściowe charakteryzujące wypraskę (skurcz i masę), a następnie — z wykorzystaniem technik doświadczalnych oraz metod

<sup>\*)</sup> Artykuł zawiera treść wystąpienia wygłoszonego na IX Profesorskich Warsztatach Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Szczecin—Dziwnówek, 10–12 maja 2004 r.

statystycznych w analizie danych — przedstawienie związków między nimi w postaci funkcyjnej.

#### ANALIZA STATYSTYCZNA

Zadaniem wielowymiarowej analizy regresji jest wyznaczenie ilościowych relacji pomiędzy wielkościami badanymi a bezpośrednio na nie wpływającymi wielkościami zmiennymi, oceny efektów działania takich relacji i prognozowanie zachowania się badanych zmiennych [11].

Aby poznać wpływ określonych czynników na rozpatrywany proces należy zbudować model tego procesu i statystycznie go estymować na podstawie wyników doświadczalnych. Każde z równań modelowych przedstawia mechanizm kształtowania się tylko jednej zmiennej badanej (zależnej), to znaczy wyraża relację, w jakiej cecha badana zmienia się w zależności od wartości zmiennych ją opisujących (niezależnych) [12].

Pierwszym etapem budowy modelu jest sprecyzowanie zakresu badań oraz wyszczególnienie zmiennych zależnych i niezależnych. Ważnym zadaniem jest odpowiedni dobór zmiennych niezależnych oraz wybór odpowiedniej postaci równań modelowych, czyli funkcji. Funkcja taka może być prostą zależnością liniową lub mieć bardziej złożoną postać poprzez dodanie składników potęgowych i interakcji międzyczynnikowych.

Kolejny etap to zebranie i odpowiednia selekcja danych, na podstawie których można oszacować parametry modelu. Ogólną postać takiego modelu zawierającego człon liniowy, kwadratowy oraz interakcje międzyczynnikowe zapisano w rozpatrywanym tu przypadku pięcioparametrowym równaniem (1):

$$z = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{55} x_5^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{15} x_1 x_5 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{25} x_2 x_5 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_{35} x_3 x_5 + \beta_{45} x_4 x_5 \quad (1)$$

gdzie:  $x_1$ — $x_5$  — parametry wejściowe,  $\beta_{ij}$  — współczynniki regresji ( $i, j = 1$ — $5$ ).

Następnym etapem analizy jest estymacja, czyli poszukiwanie parametrów modelu. Na podstawie wyników estymacji można podejmować kolejne kroki w celu ograniczenia liczby parametrów opisujących zmienną badaną, co prowadzi do uproszczenia modelu. Trzeba jednak każdorazowo sprawdzać wartość współczynnika korelacji ( $R^2$ ). Jeżeli jego wartość, na skutek uproszczeń modelu, wykazuje duże zmniejszenie należy zaniechać wprowadzania dalszych uproszczeń.

#### CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

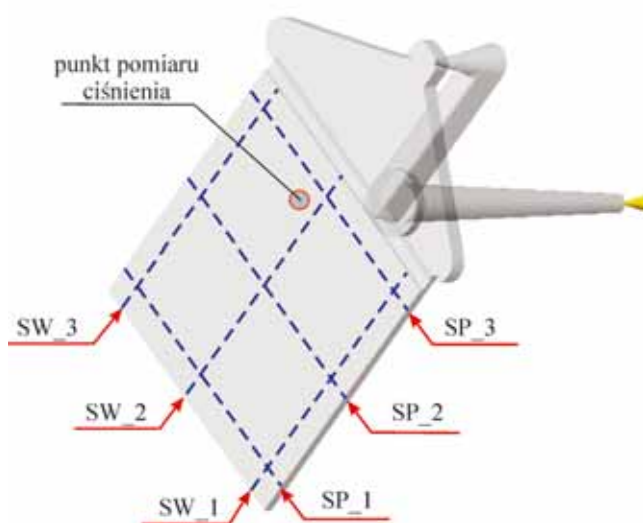
##### Materiały

Do badań wybrano dwa rodzaje tworzyw, mianowicie częściowo krystaliczny polioksymetylen (POM) „Santial M8” firmy Rhodia Engineering Plastics (Fran-

cja) [19] oraz bezpostaciowy polistyren (PS) „Styron 678 Cl” (przezroczysty) firmy DOW Chemicals (Wielka Brytania) [20].

##### Przygotowanie wyprasek

Tworzywa przetwarzano metodą wtryskiwania z wykorzystaniem maszyny firmy Krauss Maffei KM 65-160 C1, na której zamontowano specjalnie wykonaną formę do wytwarzania próbek badawczych do badania



Rys. 1. Wypraska z zaznaczonymi liniami oznaczania skurczu wzdluznego (SW\_1, SW\_2, SW\_3) i poprzecznego (SP\_1, SP\_2, SP\_3)

Fig. 1. Injection molding No. 2 with marked lines of determinations of longitudinal shrinkage (SW\_1, SW\_2, SW\_3) and perpendicular one (SP\_1, SP\_2, SP\_3)

skurczu tworzyw termoplastycznych [21—25]. Kształt oraz wymiary gniazda formującego wypraskę dobrano zgodnie z normami ISO 294-3:1996 (E) i ISO 294-4:1997 (E). Wymiary próbek do badań określano na specjalnie skonstruowanym stanowisku z zamontowanym czujnikiem, który pozwalał na odczyt wymiarów próbki z dokładnością do 0,001 mm. Kształt wypraski wykorzysta-

T a b e l a 1. Charakterystyka wymiarowa gniazda formującego (pomiar wykonano w temperaturze formy wynoszącej 40 °C)  
T a b l e 1. Dimensional characteristics of mold (made at mold temperature equal to 40 °C)

Linie pomiaru skurczu	Wymiary wypraski, mm
SP_1	61,041
SP_2	61,035
SP_3	61,042
SW_1	61,054
SW_2	61,062
SW_3	61,048

nej do badań przedstawia rys. 1, a wymiary gniazda formującego na poszczególnych liniach oznaczania skurczu zawiera tabela 1.

Ciśnienie tworzywa w formie mierzono za pomocą czujnika piezoelektrycznego firmy Kistler, który umożliwił rejestrację zmiany ciśnienia w funkcji czasu z rozdzielczością do 0,01 s, ustalenie wartości maksymalnego ciśnienia w gnieździe oraz dokładne wyznaczenie czasu wtrysku (określenie punktu przełączenia ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku).

## Metody badań

### Charakterystyka wypraski

Masę wyprasek ( $m$ ) oznaczano przy użyciu wagi analitycznej „Sartorius” z dokładnością  $10^{-5}$ g.

Wyznaczano średnią wartość skurczu wzdłużnego ( $\bar{S}_w$ ) i skurczu poprzecznego ( $\bar{S}_p$ ) w danym miejscu pomiarowym oraz określano wartości skurczu przetwórczego w poszczególnych obszarach wypraski.

Pomiary skurczu przetwórczego całej populacji próbek wykorzystanych w badaniach wykonano po upływie 3 miesięcy od chwili ich wytworzenia. W przypadku każdego z 27 układów doświadczeń dotyczących POM wtrysnięto 10 próbek, lecz tylko 5 próbek w odnie-

**T a b e l a 2.** Zakres zmienności wejściowych parametrów przetwórstwa POM i PS

**T a b l e 2.** Range of variability of input parameters of POM or PS processing

Parametry wejściowe	Zakres zmienności	
	POM	PS
$T_f, ^\circ\text{C}$	30—70	20—60
$T_t, ^\circ\text{C}$	180—210	200—240
$t_{ch}, \text{s}$	10—56	11—55
$v_w, \text{mm/s}$	20—120	20—120
$p_d, \text{MPa}$	30—60	20—40

sieniu do PS ze względu na dużą powtarzalność wyników. W badaniach określano wpływ temperatury wtrysku ( $T_t$ ), temperatury formy ( $T_f$ ), czasu chłodzenia ( $t_{ch}$ ), prędkości wtrysku ( $v_w$ ) i ciśnienia docisku ( $p_d$ ) na zmianę masy i wartości skurczu wyprasek. Na podstawie wstępnych prób wytypowano 5 wymienionych parametrów wejściowych [26, 27], które zmieniano w zakresach przedstawionych w tabeli 2.

Ustalony maksymalny czas trwania docisku [5] wynosił 12 s w całym planie badań, natomiast wartość czasu wtrysku ustalano indywidualnie w odniesieniu do poszczególnych układów planu; mieściła się ona w przedziale od 0,8 s do 1,4 s.

**T a b e l a 3.** Parametry wejściowe poszczególnych doświadczeń wtryskiwania POM i PS — plan badań

**T a b l e 3.** Input parameters of particular experiments of POM or PS injection molding — experiment design

Układy doświadczalne	POM					PS				
	$T_f, ^\circ\text{C}$	$T_t, ^\circ\text{C}$	$t_{ch}, \text{s}$	$v_w, \text{mm/s}$	$p_d, \text{MPa}$	$T_f, ^\circ\text{C}$	$T_t, ^\circ\text{C}$	$t_{ch}, \text{s}$	$v_w, \text{mm/s}$	$p_d, \text{MPa}$
1	40	187,5	21,5	45	52,5	30	210	22	45	35
2	40	187,5	21,5	95	37,5	30	210	22	95	25
3	40	187,5	44,5	45	37,5	30	210	44	45	25
4	40	187,5	44,5	95	52,5	30	210	44	95	35
5	40	202	21,5	45	37,5	30	230	22	45	25
6	40	202	21,5	95	52,5	30	230	22	95	35
7	40	202	44,5	45	52,5	30	230	44	45	35
8	40	202	44,5	95	37,5	30	230	44	95	25
9	60	187,5	21,5	45	37,5	50	210	22	45	25
10	60	187,5	21,5	95	52,5	50	210	22	95	35
11	60	187,5	44,5	45	52,5	50	210	44	45	35
12	60	187,5	44,5	95	37,5	50	210	44	95	25
13	60	202	21,5	45	52,5	50	230	22	45	35
14	60	202	21,5	95	37,5	50	230	22	95	25
15	60	202	44,5	45	37,5	50	230	44	45	25
16	60	202	44,5	95	52,5	50	230	44	95	35
17	30	195	33	70	45	20	220	33	70	30
18	70	195	33	70	45	60	220	33	70	30
19	50	180	33	70	45	40	200	33	70	30
20	50	210	33	70	45	40	240	33	70	30
21	50	195	10	70	45	40	220	11	70	30
22	50	195	56	70	45	40	220	55	70	30
23	50	195	33	20	45	40	220	33	20	30
24	50	195	33	120	45	40	220	33	120	30
25	50	195	33	70	30	40	220	33	70	20
26	50	195	33	70	60	40	220	33	70	40
27	50	195	33	70	45	40	220	33	70	30

### Plan badań

Plan badań przygotowano na podstawie teorii planowania doświadczeń [11, 12, 28, 29], a do jego realizacji wykorzystano moduł (DoE — Design of Experiment) programu do statystycznej analizy danych „STATISTICA” firmy StatSoft. Ze względu na to, że plany dwuwartościowe dają możliwość opisanie zjawisk tylko na poziomie funkcji liniowej, co w tego typu badaniach jest mało dokładne, do badań wybrano jeden z centralnych planów kompozycyjnych.

Po określeniu liczby parametrów wejściowych (tu 5) i zdefiniowaniu zakresu ich zmienności (por. tabela 1) wygenerowano w programie „STATISTICA” plan badań, czyli wyznaczono wartość parametrów wejściowych w odniesieniu do 27 układów doświadczalnych w przypadku każdego z tworzyw i zadając kolejno określone wartości przeprowadzono odpowiednie próby (tabela 3).

### Równanie regresji

Równanie modelu opisującego badany proces wytyskiwania [por. równanie (1)] ma następującą postać:

$$z = \beta_0 + \beta_1 T_f + \beta_2 T_t + \beta_3 t_{ch} + \beta_4 v_w + \beta_5 p_d + \beta_{11} T_f^2 + \beta_{22} T_t^2 + \beta_{33} t_{ch}^2 + \beta_{44} v_w^2 + \beta_{55} p_d^2 + \beta_{12} T_f T_t + \beta_{13} T_f t_{ch} + \beta_{14} T_f v_w + \beta_{15} T_f p_d + \beta_{23} T_t t_{ch} + \beta_{24} T_t v_w + \beta_{25} T_t p_d + \beta_{34} t_{ch} v_w + \beta_{35} t_{ch} p_d + \beta_{45} v_w p_d \quad (2)$$

gdzie:  $T_f = x_1$ ,  $T_t = x_2$ ,  $t_{ch} = x_3$ ,  $v_w = x_4$ ,  $p_d = x_5$ .

Na podstawie uzyskanych wyników zmiany masy i skurczów wypraski w funkcji parametrów wejściowych (przetwórstwa) i wykorzystania programu „STATISTICA” wyznaczano współczynniki  $\beta_{ij}$  w odpowiednich równaniach (2) w odniesieniu do wszystkich zmiennych badanych (zależnych).

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

### Modelowe równanie regresji

Analiza macierzy korelacji zmiennych (tabele 4 i 5) pozwoliła na dokonanie interpretacji związków przyczynowo-skutkowych zachodzących nie tylko pomiędzy badanymi wielkościami a parametrami wejściowymi, ale również pomiędzy samymi zmiennymi badanymi.

Zaobserwowano, że wartości współczynników korelacji ( $R^2$ ) otrzymanych w odniesieniu do POM i PS znacznie się różnią. W przypadku POM (tabela 4) zmiana masy wypraski ( $m$ ) jest silnie skorelowana z wartością ciśnienia docisku ( $p_d$ ). Dodatnia wartość  $R^2$  wskazuje, że wzrost  $p_d$  powoduje wzrost masy wypraski. Temperatura formy ma natomiast niewielki wpływ na masę wypraski. Wartość skurczu przetwórczego zarówno wzdłużnego, jak i poprzecznego, zależy w istotny sposób od wartości  $p_d$ , w tym przypadku współczynniki korelacji osiągają wartość nawet do -0,956. Zatem, decy-

**T a b e l a 4. Macierz korelacji POM**

**T a b l e 4. Matrix of correlation for POM**

		Zmienne niezależne (wejściowe)					Zmienne zależne (badane)		
		$T_f$	$T_t$	$t_{ch}$	$v_w$	$p_d$	$m$	$\bar{S}_w$	$\bar{S}_p$
Zmienne niezależne (wejściowe)	$T_f$	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,044	0,078	-0,026
	$T_t$	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,239	-0,171	-0,156
	$t_{ch}$	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,004	-0,066	0,010
	$v_w$	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,038	-0,128	-0,100
	$p_d$	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,935	-0,918	-0,956
Zmienne zależne (badane)	$\bar{m}$	-0,044	0,239	0,004	0,038	0,935	1,0	-0,965	-0,980
	$\bar{S}_w$	0,078	-0,171	-0,066	-0,128	-0,918	-0,965	1,0	0,969
	$\bar{S}_p$	-0,026	-0,156	0,010	-0,100	-0,956	-0,980	0,969	1,0

**T a b e l a 5. Macierz korelacji PS**

**T a b l e 5. Matrix of correlation for PS**

		Zmienne niezależne (wejściowe)					Zmienne zależne (badane)		
		$T_f$	$T_t$	$t_{ch}$	$v_w$	$p_d$	$m$	$\bar{S}_w$	$\bar{S}_p$
Zmienne niezależne (wejściowe)	$T_f$	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,075	-0,502	-0,462
	$T_t$	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,442	-0,487	-0,497
	$t_{ch}$	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,057	-0,137	-0,054
	$v_w$	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,104	-0,109	-0,176
	$p_d$	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,804	-0,469	-0,540
Zmienne zależne (badane)	$\bar{m}$	-0,075	0,442	0,057	0,104	0,804	1,0	-0,630	-0,704
	$\bar{S}_w$	-0,502	-0,487	-0,137	-0,109	-0,469	-0,630	1,0	0,891
	$\bar{S}_p$	-0,462	-0,497	-0,054	-0,176	-0,540	-0,704	0,891	1,0



Tabela 6. Współczynniki regresji ( $\beta_{ij}$ ) w równaniu (2) wyznaczone w odniesieniu do zmiennych badanych (zależnych) w przypadku POM i PST a b l e 6. Regression coefficients ( $\beta_{ij}$ ) of equation (2) determined respecting dependent variables investigated for POM or PS

Człony równania	$\beta_{ij}$	POM			PS		
		$m$	$\bar{S}_w$	$\bar{S}_p$	$m$	$\bar{S}_w$	$\bar{S}_p$
	$\beta_0$	11,72680	5,370757	9,451467	12,90085	4,785549	7,649767
Liniowy	$\beta_1$	-0,01087	-0,002901	-0,021823	-0,01113	-0,020004	-0,009644
	$\beta_2$	0,02758	-0,012867	-0,043809	-0,00155	-0,033780	-0,062332
	$\beta_3$	-0,00528	0,001100	0,012043	0,02801	-0,009358	-0,010404
	$\beta_4$	0,01140	-0,007405	-0,009266	-0,01317	0,004562	0,007127
	$\beta_5$	0,04796	-0,067240	-0,087725	-0,03897	0,004353	0,012931
Kwadratowy	$\beta_{11}$	-0,00015	0,000106	0,000121	-0,00004	0,000076	0,000026
	$\beta_{22}$	-0,00007	0,000016	0,000076	-0,00001	0,000071	0,000141
	$\beta_{33}$	-0,00011	0,000076	0,000107	-0,00001	0,000031	0,000036
	$\beta_{44}$	-0,00002	0,000012	0,000018	-0,00001	0,000002	0,000008
	$\beta_{55}$	-0,00018	0,000328	0,000279	0,00001	0,000097	0,000128
Interakcje	$\beta_{12}$	0,00010	-0,000015	0,000058	0,00002	0,000056	0,000033
	$\beta_{13}$	0,00018	-0,000140	-0,000141	-0,00005	0,000007	0,000028
	$\beta_{14}$	0,00002	0,000008	0,000003	0,00004	-0,000008	-0,000026
	$\beta_{15}$	-0,00003	0,000004	0,000054	0,00025	0,000010	-0,000028
	$\beta_{23}$	0,00003	-0,000003	-0,000055	-0,00009	0,000029	0,000036
	$\beta_{24}$	-0,00002	0,000009	0,000020	0,00006	-0,000014	-0,000026
	$\beta_{25}$	0,00001	0,000098	0,000180	0,00018	-0,000049	-0,000091
	$\beta_{34}$	0,00001	0,000002	-0,000021	-0,00002	-0,000005	-0,000008
	$\beta_{35}$	-0,00009	0,000014	0,000005	-0,00013	0,000017	-0,000025
	$\beta_{45}$	-0,00013	0,000064	0,000063	0,00007	-0,000050	-0,000050
Współczynnik korelacji równania (2)		0,97348	0,94928	0,97421	0,9731	0,8695	0,9258

dujący wpływ na zmiany masy i  $\bar{S}_w$  ma tylko jeden parametr, mianowicie ciśnienie docisku.

Wartości  $R^2$  wszystkich zmiennych zależnych przekraczają 0,95, co świadczy o silnej wzajemnej korelacji tych zmiennych (właściwości).

W przypadku PS (tabela 5) stwierdzono, że  $p_d$  ma mniejszy niż w odniesieniu do POM wpływ na masę wypraski (odpowiednio wartości  $R^2$  0,804 i 0,935), natomiast duże znaczenie ma temperatura wtrysku ( $R^2 = 0,442$  wobec 0,239). Wartości  $\bar{S}_w$  i  $\bar{S}_p$  zależą prawie w jednakowym stopniu od temperatury formy, temperatury wtrysku oraz ciśnienia docisku.

Wartości współczynników  $\beta_{ij}$  (tabela 6) umożliwiły określenie wartości zmiennej badanej w dowolnym punkcie przestrzeni określonej parametrami wejściowymi. Zatem można wyznaczyć, na przykład, wartość  $m$  w odniesieniu do dowolnego układu parametrów  $T_f$ ,  $T_{fr}$ ,  $t_{chr}$ ,  $v_w$  i  $p_d$ .

Duże wartości  $R^2$  całego równania (2) potwierdzają trafność wyboru modelowego równania regresji.

### Skurcz

Pomiary wartości skurczu wzdłużnego ( $\bar{S}_w$ ) w miejscach oznaczonych na rys. 1 SW\_1, SW\_2 oraz SW\_3 wykazały brak istotnych różnic w przypadku zarówno PS, jak i POM. Natomiast różnice pomiędzy wartością skurczu poprzecznego ( $\bar{S}_p$ ) mierzonego tuż za przewęż-

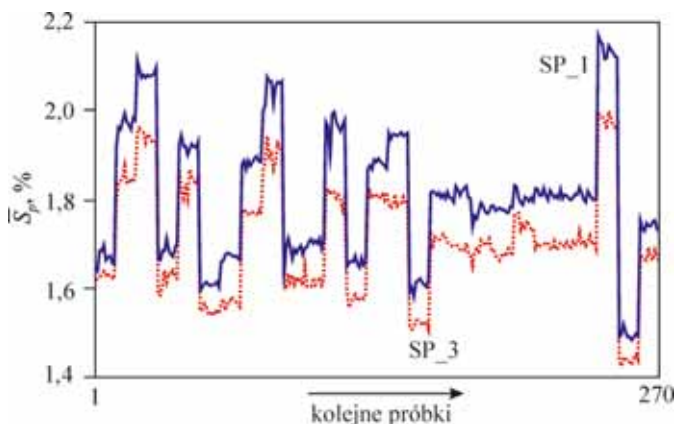
ką (SP\_3), w środku wypraski (SP\_2) oraz na końcu drogi przepływu tworzywa (SP\_1) są wyraźne. Z rysunków 2 i 3 wynika, że większe wartości  $\bar{S}_p$  występują w części wypraski najbardziej oddalonej od przewężki (punkt SP\_1). Zjawisko takie obserwuje się w odniesieniu do wszystkich badanych próbek (całej populacji).

Na podstawie przebiegu krzywych można także zaobserwować wpływ zmiennych warunków przetworstwa na wartość  $\bar{S}_p$ . Widoczne różnice wartości  $\bar{S}_p$  wynikają z odmiennej odporności tworzyw na zmianę tych warunków. Różnice te mają swoje odzwierciedlenie w dużych wartościach współczynników korelacji.

Względne różnice skurczu w poszczególnych miejscach wyprasek POM wynoszą 8–10 %. Biorąc pod uwagę niewielkie wymiary wypraski jest to wartość znaczna. Należy spodziewać się, że w przypadku większych wyprasek oraz długich dróg przepływu tworzywa różnice te mogą okazać się jeszcze większe.

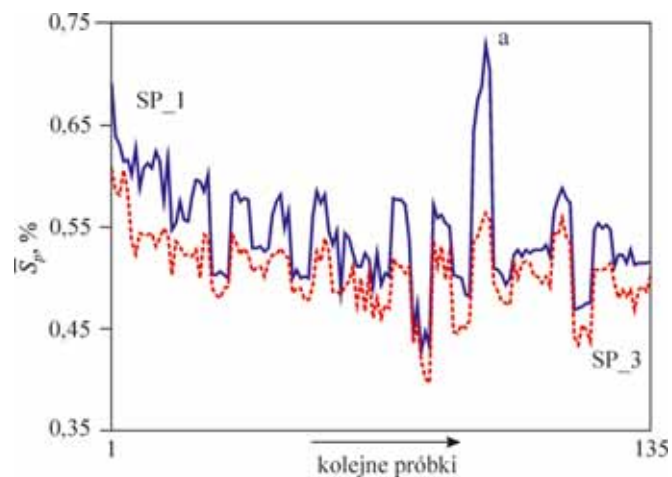
W przypadku PS (rys. 3) różnice wartości skurczu wyprasek są nieco mniejsze niż wyprasek POM. Bardzo wyraźne zmiany, znacznie większe niż w odniesieniu do POM, powoduje jedynie zmiana temperatury formy z 60 °C na 40 °C, czyli w przypadku układów doświadczalnych, odpowiednio, 18 i 19 (por. tabela 2 i punkt a na rys. 3). Względna różnica w wartości skurczu pomiędzy punktami SP\_1 i SP\_3 przekroczyła wówczas 20 %.

W celu lepszego zobrazowania, a tym samym zinterpretowania wyników wykonano profil rozkładu skur-



Rys. 2. Zmiany skurczu poprzecznego ( $\bar{S}_p$ ) całej populacji próbek POM wykonanych wg planu badań (por. tabela 2)

Fig. 2. Perpendicular shrinkage ( $\bar{S}_p$ ) changes of all POM samples investigated, prepared according to experiment design (see Table 2)



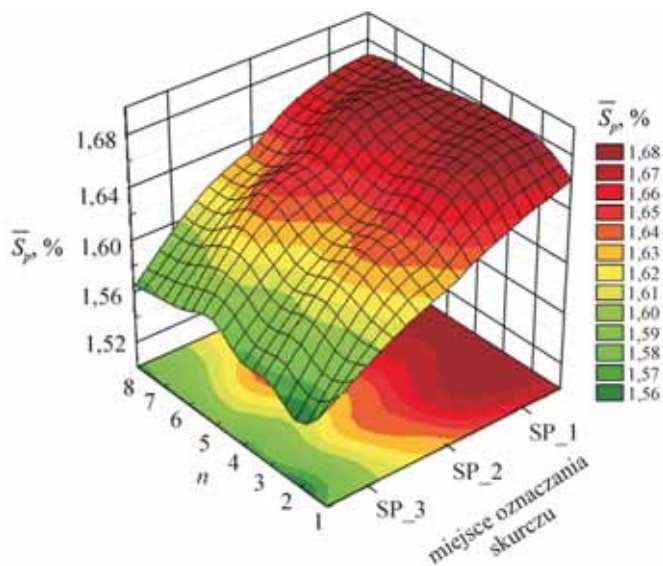
Rys. 3. Zmiany skurczu poprzecznego ( $\bar{S}_p$ ) całej populacji próbek PS wykonanych wg planu badań (por. tabela 2)

Fig. 3. Perpendicular shrinkage ( $\bar{S}_p$ ) changes of all PS samples investigated, prepared according to experiment design (see Table 2)

czu poprzecznego kilku wybranych próbek; przykład wykresu dotyczącego POM przedstawia rys. 4. Wypraski POM wykazują więc zmniejszenie wartości skurczu poprzecznego pomiędzy punktami pomiarowymi SP\_1 i SP\_3 odpowiednio z wartości 1,67 do 1,56 (czyli o 7%), a wypraski PS pomimo trzykrotnie mniejszego skurczu, wykazują jeszcze większą różnicę wartości  $\bar{S}_p$  — ok. 14%.

Wyraźne różnice w wartościach skurczu poprzecznego w poszczególnych obszarach wyprasek świadczą o odmiennych warunkach ich zestalania, jakie występują podczas wypełniania gniazda formującego, fazy docisku oraz chłodzenia.

Zjawisko to jest jedną z niedoskonałości procesu przetwórstwa tworzyw polimerowych i wynika z charakteru zjawisk reologicznych oraz cieplnych, jakie



Rys. 4. Zależność skurczu poprzecznego ( $\bar{S}_p$ ) wyprasek POM od miejsca pomiaru ( $n$  — numer kolejnej próbki z układu doświadczalnego 6 w tabeli 3)

Fig. 4. Perpendicular shrinkage ( $\bar{S}_p$ ) changes of POM moldings dependently on measurement point (SP\_1, SP\_2) ( $n$  — number of succeeding sample from experiment system No. 6 in Table 3)

występują podczas przepływu i ochładzania tworzywa w formie. Ponadto, spadek ciśnienia wtryskiwanego tworzywa i ciśnienia docisku w procesie przepływu tworzywa powoduje różne zagęszczenie poszczególnych obszarów wypraski. Tam gdzie panuje wyższe ciśnienie, tam gęstość tworzywa jest większa i odwrotnie, czego efektem jest zróżnicowanie skurczu poprzecznego.

#### PODSUMOWANIE

Stwierdzono występowanie istotnych różnic pomiędzy zależnościami wielkości badanych od zmiennych parametrów wtryskiwania omawianych tworzyw. Zmiana masy oraz skurczu przetwórczego wyprasek krystalicznego POM zależy w dużym stopniu od ciśnienia docisku i w mniejszym stopniu od temperatury wtrysku. Natomiast w przypadku bezpostaciowego PS właściwości te zależą głównie od temperatury wtrysku oraz formy i w nieco mniejszym stopniu od ciśnienia docisku. Jednak w praktyce produkcyjnej w celu sterowania wartością skurczu oraz masy wypraski najkorzystniej jest zmieniać wartość ciśnienia docisku, jako parametru szybkozmiennego (możliwość zmiany z cyklu na cykl).

Ponadto zaobserwowano zmienność skurczu w poszczególnych obszarach wyprasek. Skurcz poprzeczny jest większy w miejscach bardziej oddalonych od przewężki niż bezpośrednio za nią. Przyczyną tego może być fakt występowania różnych wartości ciśnienia oraz temperatury tworzywa wzdłuż drogi jego przepływu

w gnieździe formującym. W świetle przeprowadzonych badań celowe byłoby uzupełnienie wytycznych co do pomiaru skurczu tworzyw termoplastycznych zawartych w normie ISO o dodatkowe miejsca jego pomiaru (zwłaszcza skurczu poprzecznego). Jednocześnie należy zwrócić szczególną uwagę na układ kanałów chłodzących, który powinien być taki, aby zapewnić równomierny rozkład temperatury na powierzchni gniazda formującego.

Przedstawione tu wyniki badań doświadczalnych oraz analizy statystycznej mogą być pomocne w optymalizacji przetwórstwa tworzyw polimerowych. Jednak, aby można było je wykorzystać i odnieść do produkcji innego wytworu wtryskowego z omawianych tworzyw, konieczne jest przeprowadzenie badań porównawczych. Pozwolą one na ustalenie podobieństw wynikających z przetwórstwa danego tworzywa na wypraski innego kształtu.

#### LITERATURA

- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 501.
- Smorawiński A.: *Mechanik* 1982, 5, 299.
- Johannaber F.: „Wtryskarki”, seria Przetwórstwo Tworzyw Sztucznych, Plastech, Warszawa 2000.
- Łączyński B.: „Tworzywa sztuczne i ich przetwórstwo”, PWN, Warszawa 1980, str. 433.
- Zawistowski H., Zięba S.: „Ustawianie procesu wtrysku”, Plastech, Warszawa 1995, str. 140.
- Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989, str. 460.
- Sterzyński T.: „Interpretacja własności przetwórczych tworzyw termoplastycznych jako czynnik determinujący właściwe prowadzenie procesu wtrysku” w pracy zbiorowej: „Wtrysk termoplastów”, PAN-SIMP, Rydzyna 1983, str. 90.
- Bociąga E.: „The Influence of a Method and Conditions of Polymer Test Specimen Preparation on Results of Examinations”, Polymer Processing Society (PPS), North American Meeting, 21—24 maja 1998 r., Toronto, Kanada, materiały, str. 199—200.
- Płaska S.: *Polimery* 2002, 47, 43.
- Płaska S.: *Polimery* 2001, 46, 709.
- Płaska S.: „Optymalizacja procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych przy użyciu technik eksperymentalnych”, w pracy zbiorowej: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych” (red. Koszkuł J.), Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002, str. 628.
- Bogucki M., Płaska S., Stączek P.: *Polimery* 2003, 48, 714.
- Hawrylecka U.: *Polimery* 1988, 33, 340.
- Hawrylecka U., Sikora R.: *Polimery* 1994, 39, 34.
- Sikora R., Garbacz T.: „The Influence of Auxiliary Agents Contents on the Course of the PE Extrusion Process”, PPS, 16—18 sierpnia 2000 r., Zlin, materiały, str. 201.
- Sikora R., Kloc J.: *Kunststoffe* 1982, 72, 449.
- Bociąga E.: „The Influence of Injection Moulding Parameters on Some Properties of Polyethylene Products”, PPS, Fifteenth Annual Meeting, 1—4 czerwca 1999 r., s’Hertogenbosch, Netherlands, materiały, str. 1—7.
- Bociąga E.: *Polimery* 2000, 45, 89.
- Internet: [www.rhodia-ep.com](http://www.rhodia-ep.com)
- Internet: [www.dow.com](http://www.dow.com)
- Bociąga E.: *Polimery* 1999, 44, 198.
- Bociąga E.: „Sposób i warunki pozyskiwania próbek z tworzyw a rezultaty badań doświadczalnych”, III Profesorskie Warsztaty Naukowe „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin—Mielno 1998, materiały, str. 13.
- Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 100.
- Bociąga E.: „Warunki wypełniania gniazda formy wtryskowej a właściwości wyprasek”, VIII Profesorskie Warsztaty Naukowe „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin—Darłówek 2003 r., materiały, str. 27—28.
- Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, str. 153.
- Postawa P.: „Analiza wpływu warunków przetwórstwa na wybrane cechy wyprasek wtryskowych”, praca doktorska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska 2003.
- Koszkuł J., Postawa P.: „The Relationship Between Injection Moulding Parameters and the Quality of Moulded Parts”, PPS-18, 16—20 czerwca 2002 r., Guimarães, Portugalia, materiały.
- Płaska S.: „Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi”, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
- Polański Z.: „Planowanie doświadczeń w technice”, PWN, Warszawa 1984.