

MARCIN BOGUCKI, STANISŁAW PŁASKA, PAWEŁ STĄCZEK

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Automatykacji
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin
e-mail: bogucki@lctt.pol.lublin.pl

Techniki eksperymentalne w optymalizacji procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych — skurcz wtórny wyprasek

EXPERIMENTAL TECHNIQUES IN OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF INJECTION MOLDING OF THERMOPLASTICS — AFTER-SHRINKAGE OF MOLDINGS

Summary — Experimental presentation of the problem of injection molding of thermoplastics (low density PE) optimization, using injection molding machines of one pressure degree and constant injection rate. The two-level fractional factorial design and the method of steepest descent, being together a sequence procedure of experimental investigations, were used. The solution takes into consideration five investigated parameters (mold temperature, temperature of a polymer, injection time, time of moldings cooling, pressure — Table 1) and one result parameter — after-shrinkage of moldings (s). Particular steps of optimization investigations were described, *viz.* survey measurements (Figs. 1 and 2), looking for extremum neighborhood (Tables 2—5) and determination of a model approximating s value at extremum neighborhood (Table 6, Fig. 4). Coordinates of the point of factorial space for minimal s value were determined (Table 7). It has been found that low temperature of injection mold, long time of moldings cooling and high value of pressure show the biggest effects on shrinkage decrease. The method described let make the optimization independent on injection molding machine construction as well as on character and number of optimization criteria.

Key words: thermoplastics, injection molding process, optimization, after-shrinkage minimization, factorial design.

PROBLEM OPTIMALIZACJI PROCESU WTRYSKIWANIA

Problem optymalizacji procesu wtryskiwania podejmowano już wielokrotnie w literaturze przedmiotu [1—4]. Ogół prac poświęconych tej problematyce dotyczył głównie optymalizacji skurczu wtórnego wyprasek na podstawie przebiegu krzywych p - V - T (p - m - T). Od strony praktycznej metoda ta wymaga wyznaczenia krzywych p - V - T charakteryzujących wtryskiwane tworzywo oraz spełnienia specyficznych założeń odnoszących się do procesu izochorycznego ochładzania wyprasek w formie wtryskowej. Niezbędne jest także wyposażenie wtryskarki w układ hydrauliczny realizujący profilowany docisk. Z tych względów metoda p - V - T nie może być realizowana w wtryskarkach o jednym stopniu docisku. Ponadto jej zastosowanie jest ograniczone przebiegiem chłodzenia wyprasek w formie uzależnionym od rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowe-

go formy wtryskowej oraz od sposobu doprowadzania tworzywa do gniazda formującego [5—7].

Wymagania stawiane wypraskom wtryskowym najczęściej dotyczą nie jednego, lecz wielu kryteriów jakości. Oprócz tego, optymalizacji podlegają nie tylko cechy użytkowe wytworu, równie istotne są bowiem wskaźniki ekonomiczne procesu wtryskiwania, np. całkowity czas trwania cyklu przetwórczego lub zużycie energii. Zatem niezbędne staje się sformułowanie ogólnej metodyki prowadzenia badań optymalizacyjnych procesu wtryskiwania, niezależnej od cech konstrukcyjnych wtryskarki oraz od charakteru i liczby przyjętych kryteriów optymalizacji.

Do rozwiązania tego problemu wykorzystuje się techniki doświadczalne, za pomocą których konstruuje się modele regresji w postaci wielomianów pierwszego i drugiego stopnia aproksymujące ilościowe związki pomiędzy czynnikami wynikowymi i badanymi. Kluczo-

wą rolę w przedstawionej metodyce badań odgrywają dwuwartościowe-frakcyjne plany eksperymentalne umożliwiające efektywne prowadzenie prac doświadczalnych [8, 9].

Literatura przedmiotu [3, 4, 10] stanowiła ogólną wskazówkę skłaniającą nas do wyboru czynników badanych podczas prac doświadczalnych. Jakkolwiek ze względu na zróżnicowane właściwości układów badanych (np. konstrukcji formy wtryskowej lub układów doprowadzających tworzywo), publikowane wyniki prac doświadczalnych traktowaliśmy jedynie jako sugestię.

W przypadku dużej liczby czynników niezależnych i jednocześnie szerokiego przedziału ich zmienności ustalenie dokładnego modelu opisującego wybrane właściwości procesu wtryskiwania jest w praktyce niemożliwe do wykonania [8]. Im większy jest obszar zmienności czynników badanych, tym większa musi być liczba układów doświadczalnych wymaganych do precyzyjnego wyznaczenia współczynników regresji.

Ze względu na obszerność poruszanych zagadnień oraz celowe uproszczenie rozważań, przedstawione w artykule rezultaty badań odnoszą się tylko do jednego kryterium jakości (czynnika wynikowego) jakim jest skurcz wtórny wyprasek. Mianowicie badania optymalizacyjne miały na celu określenie współrzędnych punktu przestrzeni czynnikowej odpowiadającego najmniejszej wartości skurczu wtórnego wyprasek. Stosowana w procedurze optymalizacji funkcja celu była tożsama z funkcją opisującą skurcz wtórny wyprasek bez nakładania żadnych kryteriów warunkowych.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Przygotowanie próbek

Badane wypraski wykonano z polietylenu małej gęstości (PE-LD) „Malen E”, wykorzystując wtryskarkę ślimakową o jednym stopniu docisku i stałej prędkości wtryskiwania. Na wszystkich etapach badań stosowano tę samą formę wtryskową pozwalającą na wytwarzanie wyprasek o znormalizowanych wymiarach. Szczegółowy opis stanowiska badawczego przedstawiono w publikacji [11].

Metodyka badań

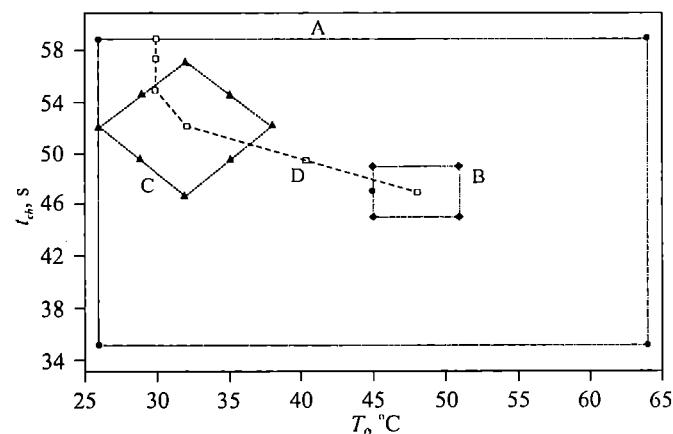
Na pierwszym etapie badań optymalizacyjnych zwerifikowano wpływ czynników badanych na zmianę wartości skurczu wtórnego wyprasek, a także oszacowano zmienność skurczu wtórnego, oraz określono wartość interakcji dwuczynnikowych.

Skurcz wtórny wyprasek (s) mierzono po upływie stałego okresu — pięć tygodni od chwili wytworzenia próbek doświadczalnych przechowywanych w stałych warunkach otoczenia. Tabela 1 zawiera zmienne niezależne oraz przedział ich zmienności.

Tabela 1. Zakres zmienności czynników badanych
Table 1. Range of variability of investigated parameters

Czynnik badany	Symbol	Jednostka	Przedział zmienności	
			min.	max.
Temperatura formy	T_f	°C	26	64
Temperatura tworzywa	T_t	°C	240	265
Czas wtryskiwania	t_{w}	s	1,25	1,75
Czas chłodzenia wyprasek	t_{ch}	s	36	60
Ciśnienie docisku (hydrauliczne)	p_d	MPa	8	12

Liczba zmiennych niezależnych była na tyle duża, że uniemożliwiła znalezienie dokładnej zależności funkcyjnej w całym zakresie ich zmienności. Ze względu na to w programie badań optymalizacyjnych zastosowano wieloetapową procedurę doświadczalną, dzieląc przestrzeń czynników badanych na obszary o wąskich przedziałach zmienności. Rysunek 1 przedstawia poszczególne etapy badań na przykładzie dwóch czynników niezależnych.



Rys. 1. Przedziały zmienności temperatury formy (T_p) i czasu chłodzenia wyprasek (t_{ch}) na poszczególnych etapach prac eksperymentalnych; (•) etap I — plan dwuwartościowy 2^{5-1}_{IV} , (♦) etap II — plan dwuwartościowy 2^{5-3}_{III} , (▲) etap III — plan kompozycyjny, (□) — ścieżka poszukiwań ekstremum; dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 1. Ranges of variability of mold temperature (T_p) and moldings cooling time (t_{ch}) at various steps of experimental work: (•) step I — 2^{5-1}_{IV} factor design, (♦) step II — 2^{5-3}_{III} factor design, (▲) step III — composition design, (□) path of the steepest descent (further explanations in the text)

Każdy spośród wytypowanych obszarów badań A, B i C ograniczonych odpowiednim planem analizowano niezależnie, ale wyniki doświadczeń interpretowano łącznie. Założono osiągnięcie takiego obszaru przestrzeni czynnikowej, w którym czynnik wynikowy (s) przybierał wartość najmniejszą. O wyborze rozłącznych obszarów badań decydowały wyniki uzyskane w procedu-

rze poszukiwania ekstremum — metoda Boxa—Wilsona [7, 8, 12]. Dwuwartościowe-frakcyjne plany eksperymentalne służyły do wyznaczenia kierunku największej zmiany wartości czynnika wynikowego. Na podstawie sekwencyjnego zastosowania opisanej techniki doświadczalnej wyznaczono obszar przestrzeni czynnikowej zawierający ekstremum. Na ostatnim etapie optymalizacji, w obszarze obejmującym ekstremum przeprowadzono doświadczenie wg założeń planu centralnego-kompozycyjnego [8, 12]. Uzyskany w ten sposób model regresji umożliwił wyznaczenie wartości czynników niezależnych, dla których skurcz wtórny wypraski przyjmuje wartość najmniejszą.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Badania przeglądowe (etap I)

W pierwszej fazie badań podjęliśmy próbę zredukowania liczby czynników badanych. Do tego celu posłużyły badania przeglądowe (wg planu dwuwartościowego typu 2^{5-1}_V) [8], umożliwiające analizę szerokiego przedziału zmienności czynników badanych (tabela 1). Wybrane układy doświadczalne przedstawiono na rys. 1 (obszar A). Z wyników pomiarów wyznaczono współczynniki modelu regresji wiążącego wartości s ze zmiennymi niezależnymi $T_f, T_t, p_d, t_w, t_{ch}$ w postaci równania:

$$s(x) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

gdzie: x — wektor czynników badanych, β_j i β_{ij} — współczynniki regresji.

Pomimo ilościowego charakteru zależności (1) ze względu na szeroki zakres zmienności czynników badanych zależność tę interpretowano jedynie w kategoriach

wstępnych oszacowań. Analiza Pareto efektów standaryzowanych (rys. 2) wykazała, że wszystkie czynniki badane są statystycznie istotne na założonym poziomie ufności $p = 0,05$. Nie istniały zatem żadne przesłanki przemawiające za ograniczeniem liczby czynników niezależnych na kolejnych etapach prac doświadczalnych. Ponadto, jak łatwo zauważyć na rys. 2, prawie wszystkie wartości efektów głównych są relatywnie większe (w sensie wartości bezwzględnej) od jakichkolwiek interakcji dwuczynnikowych. Na tej podstawie stwierdzono, że arbitralny wybór punktu początkowego rozpoczynającego iteracyjną metodę poszukiwań ekstremum nie miał istotnego wpływu na jej wynik końcowy.

Z analizy Pareto wynika również, że skurcz wtórny maleje wraz ze spadkiem temperatury formy i przedłużaniem czasu chłodzenia wyprasek w formie. Pozostałe czynniki badane mają mniejszy wpływ na zmianę wartości skurczu wtórnego, choć ich łączny wkład jest porównywalny z efektem jaki wywołuje czas chłodzenia wyprasek.

Poszukiwanie otoczenia ekstremum (etap II)

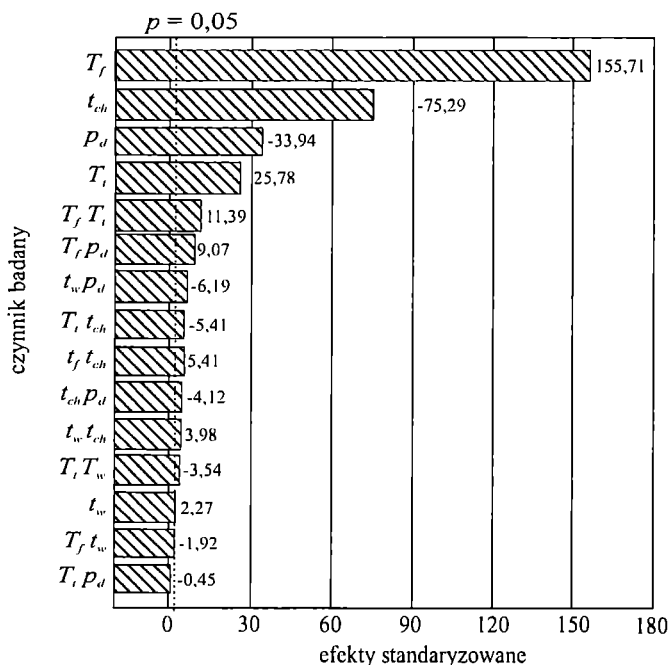
Zgodnie z założeniami metody Boxa—Wilsona, z przestrzeni czynników badanych wybrano punkt (rys. 1, obszar B), z którego rozpoczęto procedurę poszukiwania otoczenia ekstremum. Punkt ten był jednocześnie układem centralnym planu dwuwartościowego typu 2^{5-3}_{III} . Układy doświadczalne tego planu, wedle których zmieniano wartości czynników badanych, zawiera tabela 2.

T a b e l a 2. Układy doświadczalne planu dwuwartościowego typu 2^{5-3}_{III} oraz odpowiadające im wyniki pomiarów skurczu wtórnego

T a b l e 2. Investigated parameters at the experimental points of two-level factor design, type 2^{5-3}_{III} and values of response area (after-shrinkage of moldings)

Układ doświadczalny	Czynniki badane					Skurcz wtórny, %	
	T_f	T_t	p_d	t_w	t_{ch}	$s_{\text{śr}}$	σ_s ^{*)}
1	45	252	10,7	1,6	50	3,165	0,014
2	45	252	11,3	1,6	46	3,246	0,024
3	45	258	10,7	1,4	50	3,166	0,019
4	45	258	11,3	1,4	46	3,240	0,030
5	51	252	10,7	1,4	46	3,463	0,025
6	51	252	11,3	1,4	50	3,332	0,013
7	51	258	10,7	1,6	46	3,546	0,023
8	51	258	11,3	1,6	50	3,381	0,021
centrum	48	255	11,0	1,5	48	3,248	0,018

^{*)} σ_s — odchylenie standardowe.



Rys. 2. Analiza Pareto efektów standaryzowanych modelu skurczu wtórnego — plan dwuwartościowy 2^{5-1}_V

Fig. 2. Pareto analysis of standardized effects of after-shrinkage model — 2^{5-1}_V factor design

T a b e l a 3. Wartości współczynników regresji (β_j) skurczu wtórnego oszacowane na podstawie pomiarów wg planu dwuwartościowego 2^{5-3}_{III}

T a b l e 3. After-shrinkage regression coefficients values (β_j) calculated from the 2^{5-3}_{III} factor design

	Stała	T_f	T_i	p_d	t_w	t_{ch}
β_j	3,31	0,113	0,016	-0,018	0,017	-0,056

Następnie wyznaczono liniowe przybliżenie skurczu wtórnego wyprasek w funkcji czynników badanych. Wartości współczynników regresji (β_j) przedstawiono w tabeli 3. Z równania:

$$s(x) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j \quad (2)$$

obliczono współczynniki prostej reprezentującej kierunek największej zmiany wartości skurczu wtórnego i wyznaczono współrzędne kolejnych punktów doświadczalnych. Jako punkt bazowy rozpoczynający serię pomiarów wybraliśmy układ centralny planu 2^{5-3}_{III} . Za czynnik ustalający krok zmienności poruszania się w przestrzeni czynnikowej przyjęto temperaturę formy $\Delta T_f = 8^\circ\text{C}$. Zmiana temperatury formy o wartość mniejszą niż 8°C spowodowałaby zawężenie kroku zmienności pozostałych czynników do przedziału błędu pomiarowego.

Wykorzystując powyższe założenia, określono kroki zmienności pozostałych czynników badanych — ΔT_f , Δp_d , Δt_w , Δt_{ch} . Wyniki diskutowanych obliczeń, w tym układy doświadczalne wyznaczone opisywaną metodą, zostały zestawione w tabelach 4 i 5.

T a b e l a 4. Wyniki obliczeń wartości czynników badanych metodą największego spadku

T a b l e 4. Results of calculations of parameters investigated using the steepest descend method

Parametry charakteryzujące metodę	$T_f, ^\circ\text{C}$	$T_i, ^\circ\text{C}$	p_d MPa	t_w, s	t_{ch}, s
Współczynniki kierunkowe prostej	1	0,14	-0,157	0,153	-0,498
Błąd pomiaru czynnika badanego	1	0,5	0,1	0,04	0,1
Krok zmienności czynnika badanego	-8	-1,0	0,1	-0,04	2,654
Wartość minimalna	30	220	7	1	25
Wartość maksymalna	80	290	14	2,5	60

Ze zbioru układów doświadczalnych od 1 do 11 do dalszej analizy wybraliśmy układy nr 1, 2, 5 oraz 8 (tabela 5). Wymienione układy doświadczalne leżą, z dokładnością do najbardziej istotnych czynników badanych, poza obszarem wyznaczonym przez siatkę eksperymentu dwuwartościowego typu 2^{5-3}_{III} . Porównanie wartości skurczu wtórnego aproksymowanego za pomocą użyte-

T a b e l a 5. Współrzędne punktów doświadczalnych leżących wzdłuż kierunku największej zmiany skurczu wtórnego wraz z wartościami powierzchni odpowiedzi (skurczu wtórnego)

T a b l e 5. Coordinates of measuring points lying along the line of steepest descent of after-shrinkage and the values of response surface

Układy doświadczalne	Czynniki badane					Wartość skurczu, %	
	$T_f, ^\circ\text{C}$	$T_i, ^\circ\text{C}$	p_d MPa	t_w, s	t_{ch}, s	modelowa	zmierzona
centrum 2^{5-3}_{III}	48	255,0	11,0	1,50	48,0	3,307	3,24
1	40	254,0	11,1	1,46	50,6	2,913	2,98
2	32	253,0	11,2	1,42	53,3	2,520	2,62
3	30	251,0	11,4	1,38	56,0	2,347	—
4	30	250,0	11,5	1,34	58,6	2,253	—
5	30	249,5	11,6	1,30	60,0	2,193	2,46
6	30	248,0	11,7	1,26	60,0	2,173	—
7	30	247,0	11,9	1,22	60,0	2,153	—
8	30	246,0	12,0	1,17	60,0	2,133	2,40
9	30	245,0	12,1	1,13	60,0	2,113	—
10	30	244,0	12,3	1,09	60,0	2,093	—
11	30	243,0	12,4	1,05	60,0	2,073	—

T a b e l a 6. Wartości czynników badanych i odpowiednie wartości skurczu wtórnego uzyskane na podstawie planu kompozycyjnego

T a b l e 6. Values of parameters investigated and after-shrinkage respective values obtained from composition design

Układy doświadczalne	Czynniki badane					Skurcz wtórny, %	
	$T_f, ^\circ\text{C}$	$T_i, ^\circ\text{C}$	p_d MPa	t_w, s	t_{ch}, s	s_{sr}	σ_s
1	26	252,7	11,2	1,42	53,3	2,466	0,019
2	29	250,7	11,0	1,34	55,8	2,523	0,021
3	29	250,7	11,0	1,50	50,8	2,617	0,023
4	29	250,7	11,4	1,34	50,8	2,551	0,026
5	29	250,7	11,4	1,50	55,8	2,468	0,018
6	29	254,7	11,0	1,34	50,8	2,604	0,019
7	29	254,7	11,0	1,50	55,8	2,528	0,017
8	29	254,7	11,4	1,34	55,8	2,460	0,022
9	29	254,7	11,4	1,50	50,8	2,551	0,020
10	32	248,7	11,2	1,42	53,3	2,602	0,013
11	32	252,7	10,8	1,42	53,3	2,660	0,021
12	32	252,7	11,2	1,26	53,3	2,592	0,022
13	32	252,7	11,2	1,42	47,8	2,688	0,022
14	32	252,7	11,2	1,42	53,3	2,599	0,019
15	32	252,7	11,2	1,42	58,3	2,508	0,021
16	32	252,7	11,2	1,58	53,3	2,574	0,022
17	32	252,7	11,6	1,42	53,3	2,569	0,023
18	32	256,7	11,2	1,40	53,3	2,580	0,037
19	35	250,7	11,0	1,34	50,8	2,877	0,026
20	35	250,7	11,0	1,50	55,8	2,662	0,037
21	35	250,7	11,4	1,34	55,8	2,676	0,029
22	35	250,7	11,4	1,50	50,8	2,710	0,024
23	35	254,7	11,0	1,34	55,8	2,644	0,016
24	35	254,7	11,0	1,50	50,8	2,752	0,019
25	35	254,7	11,4	1,34	50,8	2,710	0,014
26	35	254,7	11,4	1,50	55,8	2,613	0,021
27	38	252,7	11,2	1,42	53,3	2,806	0,031

go modelu z wartościami pomiarów w układach nr 5 i 8 wskazuje na znaczne rozbieżności. Tłumaczy się to tym, że punkty pomiarowe były położone z dala od obszaru, w którym obowiązuje liniowa zależność opisana równaniem (2). Natomiast wartości pomiarów skurczu wtórnego odpowiadające układom doświadczalnym 1 i 2, położonym również na zewnątrz, ale za to blisko otoczenia siatki planu 2^{5-3}_{III} były zbliżone do wyników aproksymowanych modelem liniowym (tabela 3).

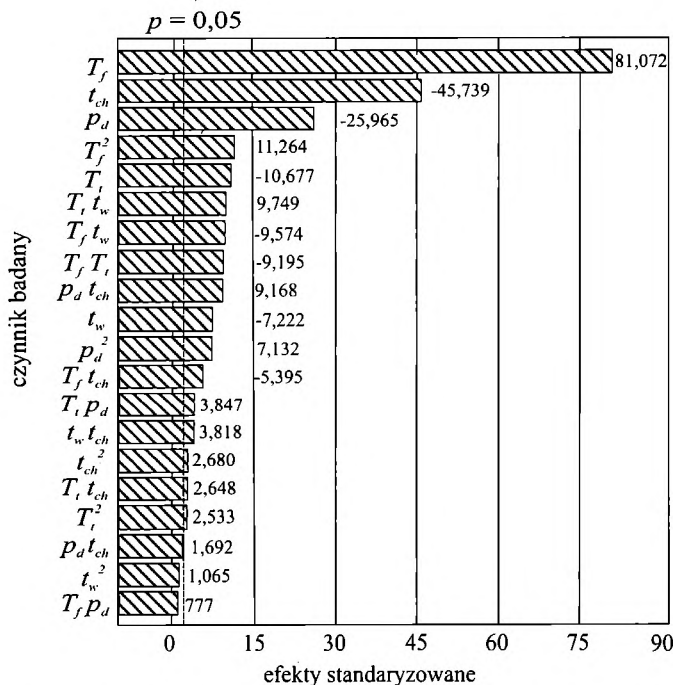
Celem zastosowania metody Boxa-Wilsons było zbliżenie się do sąsiedztwa punktu ekstremum. Punkty pomiarowe nr 5 i 8 położone są blisko hiperplaszczyny ograniczającej przestrzeń operacyjną. Osiągnięto zatem otoczenie punktu ekstremum.

Wyznaczanie modelu aproksymującego wartości skurczu wtórnego w otoczeniu ekstremum (etap III)

W celu dokładnego określenia współrzędnych i wartości minimum skurczu wtórnego wykonaliśmy badanie na podstawie planu kompozycyjnego (tabela 6). Uzyskane w ten sposób wyniki pomiarów wykorzystano następnie do konstrukcji modelu regresji wyrażonego równaniem:

$$s(x) = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 \quad (3)$$

Uwzględnia ono pomijane w dotychczasowych rozważaniach efekty krzywizny. Jądro eksperymentu stanowi plan dwuwartościowy typu 2^{5-1}_V umożliwiający



Rys. 3. Analiza Pareto efektów standaryzowanych modelu skurczu wtórnego — plan kompozycyjny
Fig. 3. Pareto analysis of standardized effects of after-shrinkage model — composition design

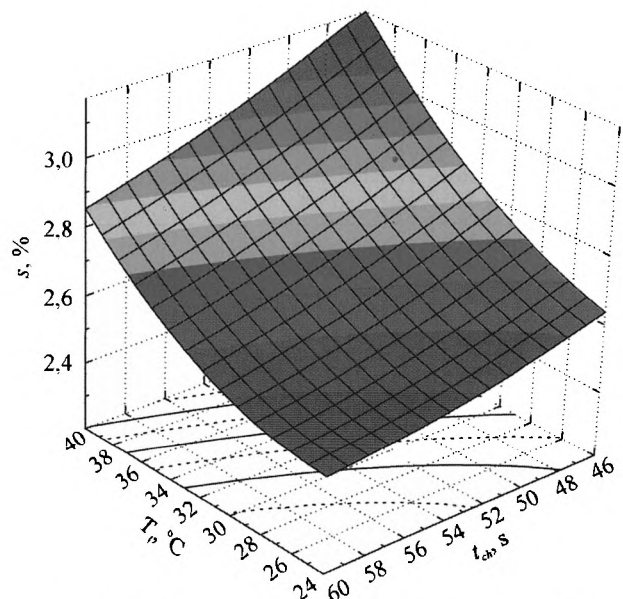
rozdzielenie efektów głównych od interakcji dwuczynnikowych. Dodatkowo, plan 2^{5-1}_V uzupełniono o układ centralny oraz o tzw. układy gwiazdne. Ogółem, w skład planu kompozycyjnego wchodziło 27 układów doświadczalnych.

Na podstawie wyników pomiarów, zależność skurczu wtórnego wyprasek od czynników badanych aproksymowano za pomocą wielomianu drugiego stopnia [równanie (3)]. Analiza Pareto efektów standaryzowanych (rys. 3) wykazuje, że dominującymi efektami są czynniki liniowe modelu. Wyraźne efekty krzywizny odpowiadają jedynie takim czynnikom jak temperatura formy (T_f) i ciśnienie docisku (p_d) oraz niektórym interakcjom dwuczynnikowym. Wyznaczenie współrzędnych oraz wartości minimum skurczu wtórnego na podstawie analitycznej postaci modelu opisanego równa-

Tabela 7. Wartość i współrzędne minimum powierzchni odpowiedzi

Table 7. Value and the coordinates of the response area minimum

Współrzędna	Wartość
T_f	26
T_i	253,98
p_d	11,27
t_w	1,26
t_{ch}	58,3
Minimum	2,341%



Rys. 4. Zależność skurczu wyprasek (s) od temperatury formy (T_f) i czasu chłodzenia wyprasek (t_{ch}) w otoczeniu minimum powierzchni odpowiedzi; skurcz zwiększa się od barwy zielonej do czerwonej

Fig. 4. Dependence of moldings shrinkage (s) on mold temperature (T_f) and moldings cooling time (t_{ch}) at response area minimum neighborhood; shrinkage increases from green to red colour

niem (3) kończy procedurę optymalizacji. Odpowiednie wyniki zawiera tabela 7. Przestrzenny wykres (rys. 4) ilustruje zależność skurczu wtórnego w otoczeniu minimum.

WNIOSKI

Doświadczalna optymalizacja procesu wtryskiwania mająca na celu minimalizację skurczu wtórnego pozwoliła na zmniejszenie jego wartości do 2,3%, czyli o 50% (typowo występujący skurcz wtórny mieści się w przedziale 4—5%). Stwierdzono, że czynniki badane w największym stopniu decydujące o zmniejszeniu wartości skurczu wtórnego to: niska temperatura formy, długi czas chłodzenia wyprasek w formie oraz duża wartość ciśnienia docisku (por. tabela 7). Pozostałe czynniki odgrywały drugorzędą rolę w procesie optymalizacji. Dalsze obniżanie temperatury formy oraz przedłużanie czasu chłodzenia wyprasek mogłoby wprawdzie prowadzić do jeszcze większej redukcji skurczu wtórnego (rys. 4), ale jednocześnie pogarszałoby wskaźniki ekonomiczne procesu wtryskiwania.

Porównując ze sobą wyniki analiz Pareto efektów standaryzowanych uzyskanych w poszczególnych fazach doświadczalnych (rys. 2 i 3) zauważa się, że udziały efektów głównych w każdym z modeli są w dużym stopniu zachowane. Wykorzystując ten fakt, można w przybliżeniu, ale za to efektywnie skonstruować model regresji ograniczając się jedynie do wyznaczenia współczynników najbardziej istotnych czynników (np. temperatury formy i czasu chłodzenia); przybliżone wartości współczynników regresji pozostałych czynników można oszacować na podstawie wcześniej ustalonych udziałów.

Praktycznym efektem procesu optymalizacji są także modele analityczne opisujące zmienność skurczu wtórnego w funkcji czynników badanych. W wielu przypadkach prawidłowe ustawienie procesu wtryskiwania opiera się na wiedzy eksperckiej technologa zdobytej niejednokrotnie na drodze prób i błędów. Modele regresji umożliwiają precyzyjne określenie warunków wtrys-

kiwania odpowiadających przyjętej z góry pożądanej wartości skurczu wtórnego, bez wykonywania dodatkowych doświadczeń.

Uzyskane modele regresji stosuje się również w algorytmach sterowania procesem wtryskiwania. Formalnie biorąc, cykl procesu wtryskiwania termoplastów dzieli się na kilka następujących po sobie faz. W każdej z nich mogą wystąpić zakłócenia zmiennych niezależnych uwzględnionych w równaniach regresji. Wykorzystując analityczną postać modelu można korygować zmienne niezależne, tak aby kompensowały efekt zakłóceń.

LITERATURA

1. Zawistowski H.: „Aktywna kontrola jakości tworzyw sztucznych”, Plastech, Warszawa 1996, str. 20.
2. Zawistowski H.: *Mechanik* 1997, nr 2, 65.
3. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989.
4. Smorawiński A.: *Mechanik* 1982, nr 5, 299.
5. Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
6. Lackowski B.: *Mechanik* 1982, nr 8—9, 479.
7. Bociąga E.: *Polimery* 2002, 47, 122.
8. Polański Z.: „Metodyka badań doświadczalnych”, Wydawnictwo AGH, Kraków 1982.
9. Montgomery D. C.: „Introduction to Statistical Quality Control”, John Wiley & Sons, Nowy Jork 1997.
10. Zawistowski H., Zięba S.: „Ustawianie procesu wtrysku”, Plastech, Warszawa 1997.
11. Bogucki M., Stączek P., Płaska S.: „Komputerowy system pomiarowo-sterujący dla wtryskarek ślimakowych”, wystąpienie na konferencji „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo”, Częstochowa, 9—10 października 2000 r.
12. Myers R. H., Montgomery D. C.: „Response Surface Methodology”, John Wiley & Sons, Nowy Jork 1995.

Otrzymano 28 IX 2002 r.