

JACEK FIGŁOWSKI, MAREK KOZŁOWSKI,
RYSZARD STELLER

Politechnika Wrocławska
Instytut Technologii Organicznej i Tworzyw Sztucznych

Przenoszenie skali ślimaków maszyn przetwórczych na podstawie modelu podstawowego

SCALE TRANSFER FOR THE SCREWS OF PROCESSING MACHINES ON THE BASIS OF A BASIC MODEL.

Summary — The methods of dimensional changes of screw basing on the application of similarity theory to the analysis of the screw plasticating processes have been discussed. These methods make it possible to design a series of types of screws deriving from a common basic model and therefore characterized by a considerable similarity of the plasticating processes under conditions of various yield, power demand etc. The ratio of the diameter of the designed screw, D_o , to the diameter of the basic screw, D_o is taken as a parameter characterizing the dimensional changes.

Postęp w zakresie wykorzystania tworzyw sztucznych wynika zarówno ze stale rosnącej liczby nowych polimerów o polepszonych właściwościach, jak i z rozwoju oraz udoskonalania urządzeń przetwórczych. W tej ostatniej dziedzinie największe zmiany obserwuje się w automatyzacji i sterowaniu procesami wytryskiwania i wytłaczania oraz w optymalizacji konstrukcji ślimaków. W cyklu artykułów przedstawiliśmy kryteria oceny ślimaków wtryskowych [1], omówiliśmy charakterystykę krajowych ślimaków wtryskowych [2], przedstawiliśmy materiały do ich wytwarzania [3], a także reologiczne podstawy projektowania ślimaków [4].

Projektowanie ślimaków stanowi skomplikowany problem techniczny. Mimo niewątpliwie dużej zgromadzonej wiedzy o samym materiale przetwarzanym oraz znajomości podstawowych procesów zachodzących w maszynach przetwórczych, nie można do chwili obecnej stworzyć optymalnych konstrukcji ślimaków na podstawie tylko tych danych. W pełni zadowalające wyniki odnośnie przebiegu procesu przetwórstwa oraz jakości wyrobów są możliwe dopiero po przeprowadzeniu długotrwałych prób i uwzględnieniu odpowiednich poprawek empirycznych. Dlatego dużego znaczenia nabierają metody umożliwiające odwzorowanie i przeniesienie skali ślimaków, które potwierdziły swe walory w praktyce. Poniżej przedstawiamy krytyczny przegląd metod służących temu celowi.

ANALIZA TEORII ZMIANY SKALI ŚLIMAKA

Typowy ślimak składa się, jak wiadomo, z trzech podstawowych stref roboczych, zwanych strefami zasilania, stapiania (przemiany), oraz dozowania. Najstarsza teoria zmiany wymiarów ślimaka zaproponowana przez Carley'a i McKelvey'a [5] opiera się na analizie zmian mających za podstawę funkcje strefy dozowania. Autorzy wykazali, że ze zmianą średnicy ślimaka podstawowego z D_o na D wydatek masowy (m) i zapotrzebowanie mocy (P) wzrastają w stosunku $(D/D_o)^3$ pod warunkiem, że głębokość kanału ślimaka i jego szerokość zmieniają się proporcjonalnie do zmiany średnicy, a liczba obrotów nie ulega zmianie. Takie rozwiązanie zakładające, że wydatek zmienia się z trzecią potęgą stosunku średnic może być stosowane jedynie podczas projektowania ślimaków działających jako dozownik stopionych lub rozpuszczonych polimerów. Doświadczenie wskazuje, że wydatek maszyn ślimakowych, w których zachodzi proces uplastyczniania, jest limitowany ich zdolnością uplastyczniania, zależną w pierwszym rzędzie od warunków pracy strefy stapiania. Zgodnie z danymi teoretycznymi i doświadczalnymi, stapianie polimeru zachodzi głównie na powierzchni cylindra układu uplastyczniającego [6–8]. Wynika stąd, że wraz ze zmianą skali ślimaka wydatek rośnie proporcjonalnie do kwadratu stosunku średnic lub, dokładniej, proporcjonalnie do względnej zmiany powierzchni cylindra otaczającego ślimak w strefie przemiany. Dla zachowania

stałej szybkości ścinania stopionego tworzywa jest konieczne zwiększenie szerokości kanału w przeskalowanym ślimaku proporcjonalnie do ilorazu średnic D/D_o . W tym celu należy także zwiększyć głębokość kanału oraz zmniejszyć liczbę obrotów ślimaka proporcjonalnie do wartości $(D/D_o)^{1/2}$.

Obecnie istnieje szereg teorii umożliwiających projektowanie „geometrii” i przewidywanie warunków pracy ślimaków przez zmianę skali modelu podstawowego [9–12]. Teorie te opierają się na ogólnej teorii podobieństwa [13] (w tym wypadku hydrodynamicznego i energetycznego), a jako parametr będący miarą tego podobieństwa przyjmują stosunek średnic ślimaka projektowanego D i ślimaka modelu podstawowego D_o . Przy takim podejściu stosunek dowolnej wielkości A (np. wydatku) charakteryzującej model projektowany i odpowiadającej jej wielkości A_o w modelu podstawowym można wyrazić w postaci potęgowej funkcji stosunku średnic tych modeli:

$$\frac{A}{A_o} = \left(\frac{D}{D_o} \right)^\beta \quad (1)$$

gdzie: β — wykładnik potęgowy zależny od charakteru wielkości oraz warunków procesu.

Ogólnie biorąc, wyniki tych teorii można stosować do typoszerzegów ślimaków o stałym lub zmiennym stosunku długości L do średnicy D obejmującym różne wypadki (np. stałe L — zmienne D , zmienne L — stałe D , zmienne L — zmienne D), a także o stałym lub zmiennym kącie nachy-

Tabela 1. ZESTAWIENIE WARTOŚCI WYKŁADNIKÓW POTĘGOWYCH RÓWNAŃ (1)

Wielkość *)	Wartość β wg różnych autorów			
	[9]	[10]	[11]	[12]
L/L_o	1	1/2	1	$1+\omega$
h/h_o	$1-\theta$	1/2	1	ψ
n/n_o	$-\theta$	-1/2	0	$-X$
m/m_o	$3-2\theta$	2	3	$2+\psi-X$
P/P_o	$3-\theta$	2,5	3	$2+\psi-X$

*) L — długość ślimaka, h — głębokość kanału ślimaka, n — liczba obrotów ślimaka, m — wydatek masowy przepływu, P — moc, ω — parametr określający stopień nieizotermiczności procesu, ψ — wykładnik potęgowy określający zmianę długości ślimaka, X — wykładnik potęgowy określający zmianę liczby obrotów, θ — wykładnik potęgowy określający zmianę głębokości kanału; indeks „o” odnosi się do ślimaka podstawowego.

lenia zwoju φ . Tabela 1 zawiera wykładniki potęgowe β z równania (1) odnoszące się do różnych wielkości A/A_0 .

Stopień nieizotermiczności procesu uwzględnia parametr Θ . W wypadku ślimaków bez ogrzewania i chłodzenia (neutralnych) wartość Θ można określić wg wzoru:

$$\Theta = \frac{1}{2} \frac{T_o - T_d}{T_d - T_z} \quad (2)$$

gdzie: T_o — temperatura na końcu strefy przemiany, T_d — temperatura na końcu strefy dozowania, T_z — temperatura w strefie zasilania.

Wykładniki potęgowe zaproponowane w pracy [12] są wzajemnie od siebie zależne, a ponadto stanowią funkcję stałych materiałowych. Ilustruje to tabela 2.

Tabela 2. WARTOŚCI WYKŁADNIKÓW POTĘGOWYCH ψ I X W ODNIESIENIU DO ŚLIMAKÓW O STAŁYM KĄCIE NACHYLENIA ZWOJU

$\psi_{\Delta\theta_h} = \frac{(1+\omega)(2-\alpha)}{4-3\alpha-2\xi} \leq \psi = 1 + \frac{\omega - X(1-\alpha+\xi)}{2-\alpha+\xi} \leq \psi_q = \frac{(1+\omega)(2-\alpha)}{3-2\alpha+\xi}$			
$X_{\Delta\theta_h} = \frac{\psi_{\Delta\theta_h}(2+\xi) - (\omega+\xi)}{1-\xi} > X > X_q = \frac{\psi_q(1+\xi) - (\omega+\xi)}{1-\xi}$			
Zmiany geometryczne	$L/D = \text{const} \rightarrow \omega = 0$	Zmiany fizyczne	$\Delta\theta_L = \text{const} \rightarrow -\dot{\gamma} = 0$
	$L/h = \text{const} \rightarrow \psi = 1+\omega$		$\eta/\eta_0 = (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{-\alpha}$
	$h/D = \text{const} \rightarrow \psi = 1$		$\eta = \text{const} \rightarrow \alpha = 0$
	$h/D = \text{const}, L/D = \text{const} \rightarrow \psi = 1, \omega = 0$		$\Delta\theta_L/\Delta\theta_{L_0} = (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{-\alpha}$
Zmiany geometryczne	$L/h = \text{const}, L = \text{const} \rightarrow \psi = 1, \omega = 0$	Zmiany fizyczne	
	$L/h = \text{const}, L = \text{const} \rightarrow \psi = 0, \omega = -1$		

$\Delta\theta_h$ — średnia różnica temperatury stopionego tworzywa i ścianki cylindra, $\Delta\theta_L$ — różnica temperatury tworzywa w strefie dozowania, q — jednostkowa moc ogrzewania, $\dot{\gamma}$ — szybkość ścinania, η — lepkość dynamiczna, ξ — wykładnik potęgowy; symbole typu ψ , X , podają wartości ψ i X odnoszące się do stałych wartości indeksu „1”, indeks „0” odnosi się do ślimaka podstawowego.

Większość stosowanych metod zmiany skali ślimaka zakłada, że szybkość stapiania tworzywa na jednostkę powierzchni cylindra (Ω) jest stała. Dlatego też całkowita szybkość stapiania, a w konsekwencji i wydatek masowy, winny zmieniać się proporcjonalnie do zmian powierzchni cylindra. Nowsze prace Chunga [14–16] nie potwierdzają jednak tego założenia. Ω zależy bowiem od szerokości kanału W , obwodowej szybkości V oraz od temperatury cylindra. Ω rośnie ze wzrostem V i maleje ze wzrostem W , co wyraża przybliżona zależność:

$$\Omega \left(\frac{V}{W} \right)^{1.2} \quad (3)$$

Ponieważ ze zmianą skali wartość V rośnie w stosunku $(D/D_0)^{1/2}$, a wartość W w stosunku D/D_0 , dlatego też wartość Ω jest proporcjonalna do $(D/D_0)^{1/4}$.

Całkowita szybkość stapiania polimeru jest równa iloczynowi Ω i powierzchni cylindra w strefie przemiany S_m . W konsekwencji zmiana wydatku masowego proporcjonalnego do całkowitej szybkości stapiania wynosi:

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} = \frac{(S_m)_D}{(S_m)_{D_0}} \cdot \frac{\Omega_D}{\Omega_{D_0}} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{-1.4} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^{1.75} \quad (4)$$

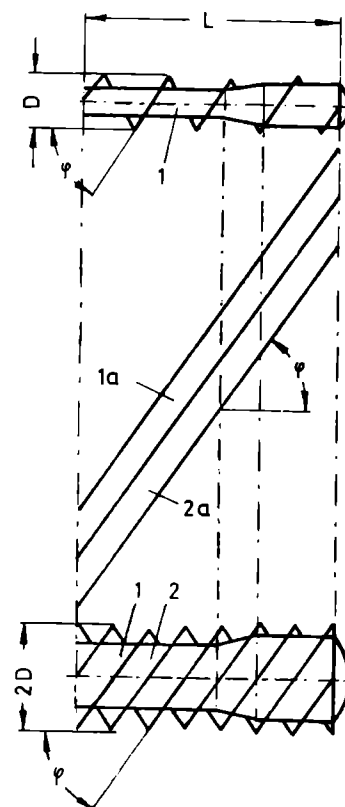
Chociaż więc powierzchnia cylindra wzrasta w stosunku $(D/D_0)^2$, to całkowita zdolność stapiania oraz wydatek masowy wzrastają w mniejszym stopniu.

Analiza przeprowadzona przez Chunga wskazuje na trudności w zbilansowaniu wydajności poszczególnych stref ślimaka. W rezultacie, po zwiększeniu wymiarów ślimaka zmiana całkowitej szybkości stapiania tworzywa jest niewystarczająca (mniejsza niż kwadrat stosunku średnic), nato-

miast wydajności stref zasilania i dozowania rosną szybciej niż to jest potrzebne. Obwodowa szybkość ślimaka i moc jednostkowa także wzrastają. Wzrost szybkości obwodowej oraz deficyt wydajności strefy stapiania stanowią podstawowe problemy towarzyszące zmianie skali ślimaka. Zrównoważenie wydajności stref jest możliwe na drodze powiększenia powierzchni cylindra w strefie przemiany i jej zmniejszenia w strefach zasilania i dozowania. Szybkość obwodowa ślimaka i jednostkowe zużycie mocy są wzajemnie powiązane. Mniejsza szybkość obwodowa, pożądana ze względu na zmniejszone zużycie mocy, obniża temperaturę stopionego tworzywa, a tym samym zmniejsza szybkość stapiania, która i tak jest niewystarczająca ze względu na zwiększenie wymiarów ślimaka. Wynika stąd wniosek, że w tym zakresie potrzebny jest kompromis, a najbardziej korzystna zmiana skali ślimaka możliwa jest tylko na podstawie dokładnej analizy zmian zachodzących w poszczególnych strefach.

GEOMETRYCZNE UWIELOKROTNIENIE ŚLIMAKA

Geometryczne uwielokrotnienie ślimaka zostało zaproponowane przez Becka [17]. Metoda ta jest szczególnie prosta wówczas, gdy w jednakowy sposób zmienia się stosunek średnic oraz stosunek liczby zwojów. W takim wypadku kąt nachylenia zwoju we wszystkich ślimakach danego typu szeregu nie ulega zmianie. Ilustruje to rys. 1. Kanał 1



Rys. 1. Zasada geometrycznego uwielokrotnienia ślimaka (oznaczenia w tekście)

ślimaka o średnicy D i długości L oraz kącie nachylenia zwoju φ rozwija się na kanał 1a leżący w płaszczyźnie rysunku. Jeśli równoległe do kanału 1a dostawić identyczny kanał 2a, a następnie oba kanały nawinąć na trzpień o średnicy $2D$, to uzyskuje się ślimak o identycznych kanałach i kącie nachylenia zwoju. Ponieważ zmiana krzywizny kanału wywiera stosunkowo niewielki wpływ na przebieg procesu uplastyczniania tworzywa [18] uwielokrotniony w powyższy sposób ślimak pracuje w identycznych warunkach jak ślimak podstawowy, pod warunkiem proporcjonalnego zmniejszenia liczby obrotów (w tym wypadku o połowę). Całkowita szybkość uplastyczniania, a tym samym i wydatek masowy, zostają jednak w podobny sposób zwielokrotnione.

PODSUMOWANIE

Projektowanie geometrii ślimaków na drodze zmiany skali modelu podstawowego jest oparte na teorii podobieństwa hydrodynamicznego i energetycznego. Zmiana wymiarów poszczególnych elementów ślimaka najczęściej nie jest proporcjonalna do zmiany skali, której miarą może być stosunek średnic ślimaka projektowanego i podstawowego. W chwili obecnej brak jest w pełni zadowalającej metody zmiany skali ślimaka. Wydajność uplastyczniania ślimakowego jest determinowana głównie całkowitą szybkością stapiania, która w wyniku przeskalowania zmienia się w mniejszym stopniu niż wydajność w strefach zasilania i dozowania. Stąd też podczas projektowania nowego ślimaka na podstawie znanej geometrii ślimaka podstawowego należy zwrócić szczególną uwagę na zmiany w strefie stapiania, dążąc do uzyskania możliwie największej wydajności tej strefy. Jednym z możliwych sposobów ominięcia występujących przy tym trudności jest metoda uwielokrotnienia geometrycznego, prowadząca jednak do ślimaków o zwiększonej krotności kanałów oraz ograniczająca średnice przeskalowanych ślimaków do wielokrotności średnicy ślimaka podstawowego.

LITERATURA

1. Kozłowski M., Pigłowski J., Steller R.: *Polimery* 1984, 29, 257.
2. Kozłowski M., Pigłowski J., Steller R.: *Polimery* 1985, 30, 160.
3. Kozłowski M., Pigłowski J., Steller R.: *Polimery* 1985, 30, 275.
4. Steller R., Kozłowski M., Pigłowski J.: *Polimery* 1986, 31, 60.
5. Carley J.F., McKelvey J.M.: *Ind.Eng.Chem.* 1953, 45, 985.
6. Donovan R.C.: *Polym.Eng.Sci.* 1971, 11, 427.
7. Tadmor Z.: *Polym.Eng.Sci.* 1966, 6, 185.
8. Tadmor Z., Gogos C.G.: „Principles of Polymer Processing”, John Wiley & Sons, Nowy Jork 1979.
9. Bogdanov V.V.: „Smesenie polimerov”, Nauka, Leningrad 1979.
10. Chung C.: *Polym.Eng.Sci.* 1974, 14, 28.
11. McKelvey J.M.: „Polymer Processing”, John Wiley & Sons, Nowy Jork 1962.
12. Potente H.: *Kunststoffe* 1981, 71, 428.
13. Praca zbiorowa: „Podstawowe Procesy Inżynierii Chemicznej”, PWN, Warszawa 1982.
14. Mount E.M., Chung C.: *Polym.Eng.Sci.* 1978, 18, 711.
15. Mount E.M., Watson J.G., Chung C.: *Polym.Eng.Sci.* 1982, 22, 729.
16. Chung C.: *Polym.Eng.Sci.* 1984, 24, 627.
17. Beck E.: *Kunststoffe* 1979, 69, 204.
18. Tadmor Z., Klein I.: „Engineering Principles of Plasticating Extrusion”, Van Nostrand Reinhold, Nowy Jork 1970.

Otrzymano 30 V 1989 r.

Wersja skorygowana 19 IV 1990 r.