

RYSZARD STELLER¹⁾, JACEK IWKO²⁾

Modelowanie procesu uplastyczniania tworzyw polimerowych podczas wtryskiwania

Cz. I. ZAŁOŻENIA MODELU I TRANSPORT TWORZYWA STAŁEGO

Streszczenie — Przedstawiono podstawowe założenia umożliwiające zbudowanie matematycznego modelu procesu uplastyczniania podczas wtryskiwania uwzględniające rzeczywiste warunki procesu. Obejmują one np. postępowo-zwrotny ruch ślimaka (trójstrefowego) o określonym skoku, a także fazy stapiania tworzywa — faza statyczna (ślimak nieruchomy) i dynamiczna (ślimak obracający się) — będące funkcjami różnych parametrów geometrycznych, materiałowych i roboczych. Przeanalizowano ponadto przebieg procesu uplastyczniania w strefie transportu tworzywa stałego związany z ruchem ślimaka. Inne elementy modelu zostaną przedstawione w kolejnych opracowaniach.

Słowa kluczowe: tworzywa polimerowe, wtryskiwanie, modelowanie komputerowe, transport złoża stałego.

MODELING OF THE PROCESS OF POLYMERS PLASTICIZATION DURING INJECTION MOLDING. PART I. MODEL ASSUMPTIONS AND SOLID POLYMER TRANSPORT

Summary — Basic assumptions for creation of mathematical model of polymer plasticization during injection molding, taking into consideration the real process conditions, were presented. They contain e.g. the to-and-for screw motion (for tri-zonal screw) with defined stroke and the phases of static (stationary screw) and dynamic (rotating screw) melting, being the functions of various geometric (Fig. 1), material and operating parameters. Moreover, the course of plasticization process in a solid conveying zone, related to a screw motion (Fig. 2 and 3), was analyzed. The other elements of the model will be presented in forthcoming publications.

Key words: plastic materials, injection molding, computer modeling, solid bed transport.

PROCES UPLASTYCZNIANIA JAKO PRZEDMIOT MODELOWANIA

Podstawowym celem procesu uplastyczniania podczas wytłaczania bądź wtryskiwania ślimakowego jest uzyskanie — z możliwie dużą wydajnością i małym nakładem energii — uplastycznionego tworzywa o jak największym ujednorodnieniu (stopniu homogenizacji) materiałowym i termicznym. Ze względu na podobieństwo układów uplastyczniających wytłaczarek i wtryskarek, procesy uplastyczniania w obu przypadkach także wykazują pewne podobieństwo; z drugiej strony jednak zupełnie odmienna dynamika wytłaczania i wtryskiwania powoduje wyraźne różnice w ich przebiegu. Wytłaczanie jest procesem o charakterze ciągłym a uplastycznianie przebiega tu w warunkach równowagi dynamicznej. Stan taki może być zakłócany jedynie

przez stochastyczne fluktuacje parametrów o charakterze „białego szumu”.

Wtryskiwanie natomiast to proces cykliczny, w którym uplastycznianie zachodzi w warunkach ciągłej nierównowagi dynamicznej. Oznacza to, że w trakcie jednego cyklu wtryskiwania parametry procesu podlegają zmianom w czasie, niezależnie od możliwych zakłóceń o charakterze stochastycznym. W odniesieniu do kilku cykli wtryskiwania można mówić jedynie o „quazirównowadze dynamicznej” tego procesu, rozumianej jako stałość parametrów w odpowiadających sobie chwilach różnych cykli wtryskiwania.

Odmienna dynamika pracy w obu przypadkach wynika z tego, że w procesie wytłaczania tworzywo jest stapiane wyłącznie w sposób dynamiczny, tj. w warunkach obracającego się ślimaka, natomiast podczas wtryskiwania stapianie odbywa się w sposób zarówno dynamiczny, jak i statyczny (nieruchomy ślimak).

Dodatkowy czynnik, który należy uwzględnić w procesie wtryskiwania stanowi wsteczny ruch ślimaka podczas obrotów oraz istnienie sprzężeń pomiędzy różnymi stanami i parametrami procesu. Dwa najważniejsze tego typu sprzężenia, w sposób decydujący wpływające na dynamikę pracy ślimaka wtryskowego, to:

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Zakład Inżynierii i Technologii Polimerów, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

²⁾ Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Laboratorium Tworzyw Sztucznych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

e-mail: Jacek.Iwko@pwr.wroc.pl

— sprzężenie pomiędzy profilem złoza stałego tuż po rozpoczęciu rotacji i ruchu wstecznego ślimaka (początek stapienia dynamicznego) oraz profilem złoza stałego tuż po zakończeniu tego ruchu (początek stapienia statycznego),

— sprzężenie pomiędzy masowym natężeniem przepływu tworzywa w kanale ślimaka a ciśnieniem mierzonym przed ślimakiem w trakcie jego rotacji i podczas ruchu wstecznego, czyli ciśnieniem uplastyczniania lub ciśnieniem wstecznym.

Przedstawione różnice w procesie uplastyczniania podczas wytłaczania i wtryskiwania znajdują swoje odbicie w odmiennym ukształtowaniu geometrycznym elementów układów uplastyczniających, zwłaszcza ślimaków, we wtryskarkach i wytłaczarkach. Optymalizacja kształtu i wymiarów tych elementów (geometrycznej charakterystyki układu) do niedawna opierała się jedynie na dużym doświadczeniu i wyczuciu konstruktorów oraz technologów.

W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabierają rozważania teoretyczne. Związane są one z tworzeniem — na podstawie prawa zachowania masy, pędu i energii (których wyrazem są równania, odpowiednio, ciągłości, ruchu i energii) oraz charakterystyki materiału (danej w postaci termodynamicznych i reologicznych równań stanu) — matematycznych modeli procesu uplastyczniania. Modele takie wiążą podstawowe parametry uplastyczniania danego tworzywa z budową układu uplastyczniającego, umożliwiając tym samym optymalizację rozwiązań konstrukcyjnych. Tego typu ujęcie zagadnienia było możliwe dzięki szybkiemu rozwojowi technik obliczeniowych obejmujących moc obliczeniową komputerów, programowanie oraz metody numeryczne. Należy zaznaczyć, że ujęcie doświadczalne i teoretyczne wzajemnie się inspirują i uzupełniają.

Modelowe opracowania uplastyczniania na drodze tworzenia komputerowych symulacji tego procesu nabrały znacznego tempa i skali rozwoju, zwłaszcza w przypadku wytłaczania, które, ze względu na ustalony przebieg, jest procesem nieco prostszym z punktu widzenia takiego podejścia. Dlatego też istnieje spora liczba programów komputerowych (w tym także dostępnych w handlu) służących do modelowania procesów uplastyczniania podczas wytłaczania [1—17].

Dotychczas brak równie kompleksowego ujęcia zagadnienia uplastyczniania podczas wtryskiwania, a istniejące opracowania mają jedynie charakter fragmentaryczny [9, 18—20]. Główną przyczynę takiej sytuacji stanowi wspomniana już znacznie bardziej skomplikowana dynamika tego procesu prowadząca do powstawania wielu problemów zarówno opisowych, jak i interpretacyjnych.

Celem niniejszego artykułu jest omówienie ogólnych założeń matematycznego modelu uplastyczniania podczas wtryskiwania oraz wyczerpujący opis mechanizmu przebiegu procesu w strefie transportu tworzywa stalego jako istotnego fragmentu procesu uplastyczniania.

Artykuł ten z założenia jest pierwszą częścią obszernego opracowania, które ma przyczynić się do zmniejszenia istniejących obecnie dysproporcji między stanem zaawansowania teorii modelowania procesów uplastyczniania podczas wytłaczania i wtryskiwania. Publikacja nasza wskazuje pewne kierunki, które mogą być pomocne w dalszym rozwoju komputerowych modeli symulacyjnych etapu uplastyczniania w procesie wtryskiwania.

ZAŁOŻENIA MODELU MATEMATYCZNEGO

Założyliśmy, że punkt wyjścia budowanego matematycznego modelu uplastyczniania w procesie wtryskiwania stanowi model procesu wytłaczania ustalonego, w którym uwzględniono jednak procesy stapienia statycznego i dynamicznego, ruch posuwisto-zwrotny ślimaka [wpływający na zmianę położenia stref roboczych (dynamicznych) ślimaka] oraz wspomniane powyżej sprzężenia.

W prezentowanym modelu uwzględniono także dwa następujące założenia szczegółowe:

— 1. Trójstrefowy ślimak o stałym skoku zwoju S oraz określonych innych parametrach (cechach) geometrycznych jest umieszczony w cylindrze, w którym wyróżnia się dwie zasadnicze strefy:

a) strefę nieogrzewaną — której temperatura nie przekracza temperatury płynięcia tworzywa — długości N_4 , rozciągającą się od środka leja zasypowego do początku strefy ogrzewanej;

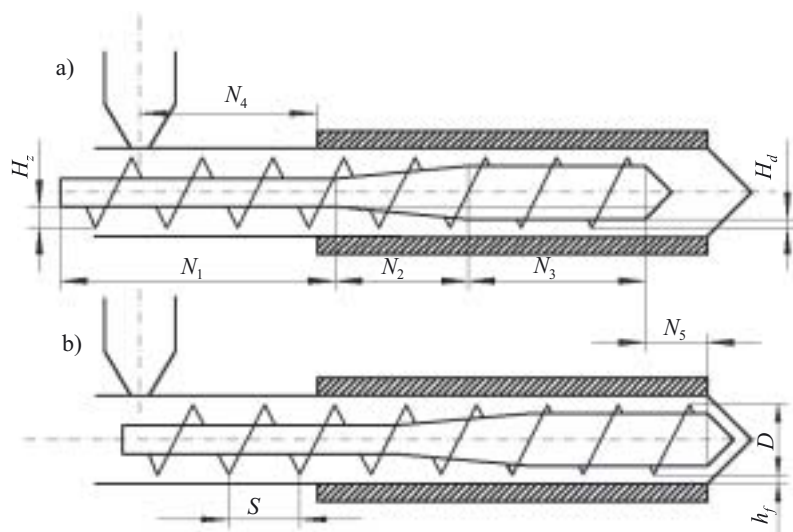
b) strefę ogrzewaną — której średnia temperatura T_b jest wyższa od temperatury płynięcia tworzywa — położoną w odległości N_4 od leja zasypowego, przy czym długość tej strefy zależy od przyjętej długości ślimaka.

Rysunek 1 przedstawia obydwie strefy z zaznaczonymi określonymi cechami geometrycznymi układu uplastyczniającego. Uwzględniono na nim dwa skrajne położenia ślimaka w cylindrze (1a i 1b) różniące się wielkością skoku ślimaka N_5 podczas wtrysku. Ze względu na prostotę i zwartość opisu, wielkości N_i są wyrażone w liczbie zwojów ślimaka.

— 2. Długości stref geometrycznych ślimaka (zasilania, sprężania i dozowania) można zmieniać w dowolny sposób, otrzymując, w skrajnym przypadku, np. ślimak jednostrefowy lub różne rodzaje ślimaków dwustrefowych. Należy zaznaczyć, że strefy geometryczne nie pokrywają się ze wspomnianymi już strefami roboczymi (dynamicznymi) scharakteryzowanymi w części poświęconej dynamice pracy układu uplastyczniającego.

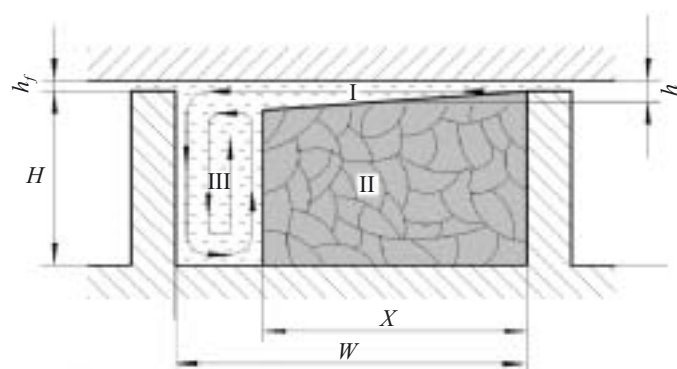
Przedstawione na rys. 1 parametry geometryczne tworzą pierwszą grupę parametrów modelu. Drugą ważną grupę stanowią regulowane parametry robocze układu uplastyczniającego. Obejmują one szybkość obrotową ślimaka, ciśnienie wsteczne (uplastyczniania), średnią temperaturę cylindra w części ogrzewanej i skok ślimaka podczas wtrysku.

Trzecia istotna grupa zawiera charakterystykę materiałową tworzywa. Są to jego cechy fizyczne (współ-



Rys. 1. Podstawowe parametry geometryczne ślimaka wtryskowego odnoszące się do jego dwóch skrajnych położenia [a) — tylne, b) — przednie]: N_1 — długość strefy zasilania, N_2 — długość strefy sprężania, N_3 — długość strefy dozowania, N_4 — odległość strefy grzejnej od lejki zasypowego, N_5 — długość skoku ślimaka, D — średnica zewnętrzna ślimaka, H_z — głębokość kanału w strefie zasilania, H_d — głębokość kanału w strefie dozowania, S — skok zwoju, h_f — wysokość szczeliny pomiędzy grzbietem zwoju ślimaka a wewnętrzną powierzchnią cylindra

Fig. 1. Basic geometric parameters of injection screw system, concerning its two extreme positions [a) back one, b) fore one]: N_1 — length of feed zone, N_2 — length of compression zone, N_3 — length of dosing zone, N_4 — distance between hopper and heating section, N_5 — length of screw lead, D — external screw diameter, H_z — channel depth in feed zone, H_d — channel depth in dosing zone, S — screw lead, h_f — flight clearance



Rys. 2. Przekrój poprzeczny kanału w strefie uplastyczniania właściwego z wyróżnionymi trzema (I, II, III) obszarami różniącymi się zachowaniem tworzywa (por. tekst)

Fig. 2. Screw channel cross-sectional area in melting zone; three areas (I, II, III) differing in polymer behavior are distinguished (see text)

czynnik tarcia tworzywa stałego o cylinder i o ślimak oraz wartości gęstości tworzywa stałego i stopionego), właściwości cieplne (ciepło topnienia, przewodnictwo cieplne tworzywa stałego i stopionego oraz ciepło właściwe tworzywa stałego i stopionego), a także właściwości reologiczne tworzywa stopionego (współczynnik temperatury lepkości oraz stałe równania potęgowe lepkości w znanej temperaturze).

Do analizy procesu przyjęto płaski model kanału ślimaka zapewniający największą prostotę opisu. W kanale ślimaka wtryskowego, w rozpatrywanej chwili tuż przed zakończeniem jego ruchu obrotowego (w położeniu tylnym, por. rys. 1a) pobierany z lejki zasypowego materiał stały w postaci granulatu lub proszku zostaje zagęszczony pod wpływem wzrastającego ciśnienia na

odcinku N_4 (charakteryzującym się najczęściej stałymi wymiarami kanału na całej długości strefy zasilania). Następnie, wchodząc w strefę ogrzewaną cylindra, tworzywo zaczyna się stapiać w warstwie stykającej się ze ścianką cylindra, a wysokość warstwy tworzywa stopionego rośnie liniowo do wysokości krytycznej δ_w . Jest to tzw. strefa uplastyczniania wstępnego. Po jej przekroczeniu profil tworzywa w kanale ślimaka ulega zmianie, przy czym w przekroju ślimaka można wyróżnić trzy podstawowe obszary różniące się jakościowo zachowaniem materiału (rys. 2).

Obszar I tworzy warstewka tworzywa stopionego średniej wysokości h występująca pomiędzy złożem stałym a powierzchnią cylindra; jej szerokość wynosi X , a średnia temperatura T_{av} . Uplastycznione tworzywo z tej warstwy przemieszcza się do obszaru III wskutek przepływu wleczonego zachodzącego w wyniku względnego ruchu ślimaka i cylindra.

Obszar II o kształcie klina zajmuje tworzywo stałe szerokości X i wysokości $(H - h)$, o średniej temperaturze T_s .

W obszarze III cyrkuluje stopione tworzywo szerokości $W - X$ i wysokości H , do którego stale dopływa strumień uplastycznionego tworzywa z obszaru I.

Strefa obejmująca opisane trzy obszary, zwana strefą uplastyczniania właściwego, rozciąga się do miejsca, gdzie stopieniu ulega cały obszar II, czyli klin materiału stałego (do $X = 0$).

Przedstawione założenia dotyczące stapiania dynamicznego oraz transportu tworzywa w poszczególnych strefach ślimaka wtryskowego nie odbiegają w sposób istotny od założeń w klasycznym ujęciu teorii uplastyczniania w toku wytłaczania [1]. Podstawowa modyfikacja wszystkich wzorów odnoszących się do procesu wytłaczania ustalonego wynika tu z konieczności uwzględ-

nienia w nich dodatkowej składowej prędkości opisującej wsteczny ruch obracającego się ślimaka. Prędkość ta określa wydajność uplastyczniania, jest odwrotnie proporcjonalna do czasu rotacji ślimaka i ma charakter dynamiczny, zależny od przyjętych parametrów procesu. Dlatego też może być wyznaczona jedynie jako granica pewnego ciągu przybliżeń podczas modelowania dynamicznego, w którym brane jest także pod uwagę istnienie fazy stapienia statycznego w warunkach nieruchomego ślimaka (bez transportu masy). Do realizacji tego celu jest konieczna ocena zmian szerokości X (lub, ściślej, pola powierzchni przekroju) tworzywa stałego na długości kanału w funkcji czasu. Ocena taka umożliwia obliczenie podstawowych charakterystyk procesu, takich jak wydajność uplastyczniania, pobór mocy a także rozkład ciśnienia i temperatury w wybranej chwili cyklu wtryskiwania, zwłaszcza w bardzo istotnym momencie rozpoczęcia i zakończenia obrotów (rotacji) ślimaka.

DYNAMIKA PRACY UKŁADU

W matematycznym modelu uplastyczniania tworzyw polimerowych podczas wtryskiwania założyliśmy istnienie pięciu stref dynamicznych analogicznych do stref występujących w procesie wytłaczania. Są to strefy: zasobnika, transportu tworzywa stałego, uplastyczniania wstępnego, uplastyczniania właściwego i transportu tworzywa stopionego.

W odróżnieniu od ustalonych warunków pracy charakterystycznych dla wytłaczania, podczas cyklu wtryskiwania długość i położenie stref dynamicznych ulega zmianie. Do opisu przebiegu procesu w wymienionych strefach w warunkach niestabilnych przyjęliśmy zatem dwa dodatkowe założenia.

W cyklu działania ślimaka wtryskowego podstawowe znaczenie mają dwa wzajemnie sprzężone stany, mianowicie (a) stan tuż przed zakończeniem rotacji ślimaka oraz (b) stan tuż po rozpoczęciu rotacji ślimaka. W odniesieniu do danego tworzywa stany te są jednoznacznie określone wartościami wymienionych powyżej parametrów geometrycznych, roboczych i materiałowych.

Wspomniane założenia dotyczą stanu (a). Po pierwsze przyjęliśmy, że stan ten, charakteryzujący się największym stopniem wypełnienia kanału ślimaka tworzywem stałym, ma podstawowe znaczenie dla oceny maksymalnej temperatury tworzywa w kanale ślimaka, maksymalnego poboru mocy ślimaka i wydajności uplastyczniania, tzn. ilości masy tworzywa uplastycznionego powstającej w jednostce czasu.

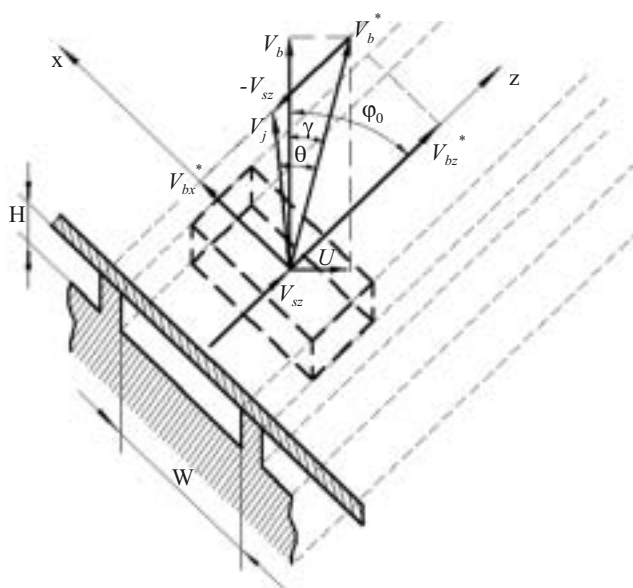
Po drugie, założyliśmy, że w stanie (a) równowaga dynamiczna w strefach zasobnika oraz transportu tworzywa stałego ustala się na tyle szybko, iż charakterystyka robocza tych stref (zwłaszcza profili ciśnienia) może zostać odpowiednio opisana zależnościami słusznymi dla warunków ustalonych [1, 2] z uwzględnieniem wstecznego ruchu ślimaka.

Długość strefy uplastyczniania wstępnego, której chwilowe położenie pokrywa się z początkiem strefy grzejnej cylindra, a wysokość warstwy stopionego tworzywa zmienia się od zera do wysokości krytycznej δ_w , również obliczano posługując się modelem odnoszącym się do warunków ustalonych. Ze względu na bardzo małą wysokość warstewki tworzywa stopionego przyjęto, iż równowaga ustala się w niej bardzo szybko, szybkość stapienia dynamicznego ω jest zatem, praktycznie biorąc, taka sama jak w przypadku warunków ustalonych [1, 2], z uwzględnieniem, niewystępującej w procesie wytłaczania, wzdłużnej składowej prędkości U cofającego się ślimaka.

W dalszym tekście przedstawiono analizę przebiegu procesu uplastyczniania w strefie transportu tworzywa stałego we wtryskarce ślimakowej, z uwzględnieniem omówionych założeń. Działanie innych stref funkcjonalnych ślimaka wtryskowego będzie przedmiotem odrębnych rozważań.

ANALIZA PROCESU UPLASTYCZNIANIA W STREFIE TRANSPORTU TWORZYWA STAŁEGO

W opracowanej analizie uwzględniamy, jak już wspomniano, ruch wsteczny ślimaka obracającego się z prędkością U . Należy podkreślić, że wielkość ta jest parametrem dynamicznym, niepodlegającym regulacji i zależnym od warunków pracy układu uplastyczniającego. Dlatego też, wyznaczenie wartości U , stanowiące jeden z głównych elementów modelowania procesu uplastyczniania, musi opierać się na całościowej analizie



Rys. 3. Schemat kinematyczny transportu warstwy tworzywa stałego (składowe prędkości ruchu materiału) w kanale ślimaka wtryskowego (por. tekst)

Fig. 3. Kinematic scheme of solid polymer conveying (velocity components of material motion) in injection screw channel (see text)

działania wszystkich stref funkcjonalnych ślimaka. W przypadku strefy transportu tworzywa stałego, wartość U będzie traktowana jako zmienny parametr pomocniczy.

Poszczególne składowe prędkości opisujące ruch tworzywa stałego przedstawiono na rys. 3. Jakościowo jest on podobny do rysunków ilustrujących ruch tworzywa stałego w procesie wytłaczania [1, 2], gdzie $U = 0$.

Zgodnie z rys. 3, warstwa stała przesuwa się względem cylindra z prędkości V_j , równą

$$\vec{V}_j = \vec{V}_b + \vec{U} - \vec{V}_{sz} \quad (1)$$

gdzie: \vec{V}_b — wektor prędkości obwodowej cylindra, \vec{U} — wektor prędkości ruchu wstecznego ślimaka, \vec{V}_{sz} — wektor prędkości warstwy stałej.

Wartości wektorów V_j oraz V_{sz} łatwo można określić na podstawie zależności geometrycznych wynikających z rys. 3, mianowicie:

$$V_j = V_b \frac{\sin(\varphi_0 - \gamma)}{\sin(\varphi_0 + \theta - \gamma) \cos \gamma} \quad (2)$$

$$V_{sz} = V_b \frac{\sin \theta}{\sin(\varphi_0 + \theta - \gamma) \cos \gamma} \quad (3)$$

$$\gamma = \arctg \left(\frac{U}{V_b} \right) \quad (4)$$

gdzie: θ — kąt transportu złoża stałego, φ_0 — kąt pochylecia linii śrubowej ślimaka, γ — kąt pomocniczy związany z prędkością wsteczną ślimaka.

Gdy $\gamma = 0$ ($U = 0$) wyrażenia (2) i (3) przechodzą w znane zależności typowe w procesie wytłaczania [1].

Uwzględniając ciągłość przepływu masowego na początku i końcu ślimaka można określić masowe natężenie przepływu \dot{m} :

$$\dot{m} = V_{sz} H_z W \rho_s \quad (5)$$

$$\dot{m} = \frac{U \pi D^2}{4} \rho_m \quad (6)$$

gdzie: ρ_s — gęstość tworzywa stałego, ρ_m — gęstość tworzywa stopionego.

Równania (5) i (6) wiążą ze sobą prędkość V_{sz} i U , umożliwiając równocześnie wyznaczenie z równania (3) kąta transportu złoża stałego θ jako funkcji U (bądź \dot{m}):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\beta \sin \gamma \sin(\varphi_0 - \gamma)}{1 - \beta \sin \gamma \cos(\varphi_0 - \gamma)} \quad (7)$$

gdzie

$$\beta = \frac{\pi D^2 \rho_m}{4 H_z W \rho_s} \quad (8)$$

Znajomość wartości kąta θ ma podstawowe znaczenie dla wyznaczania profilu ciśnienia w strefie transportu stałego, a więc i takich wielkości jak pobór mocy przez ślimak, moment skrecający ślimaka i maksymalna zdolność transportowa w tej strefie. Zagadnienia te zostaną omówione w ramach odrębnych publikacji.

W typowych warunkach procesowych parametr $1 > \beta \approx 0,9$. Ze wzoru (7) wynika, że $\operatorname{tg} \theta = 0$, jeśli $\gamma = 0$ lub $\gamma = \varphi_0$. W przedziale $0 < \gamma < \varphi_0$ kąt θ osiąga maksimum, tzn. zdolność transportowa strefy jest największa, jeżeli jest spełniony warunek:

$$\sin(\varphi_0 - 2\gamma) - \beta^2 \sin^2 \gamma = 0 \quad (9)$$

wynikający z obliczeń maksimum funkcji (7).

Przedstawione rozważania wskazują, że zdolność transportowa strefy transportu tworzywa stałego jest ściśle uwarunkowana prędkością ruchu wstecznego ślimaka. Za małą lub za dużą prędkość ruchu wstecznego ograniczają możliwość transportu w tej strefie. Sugeruje to konieczność optymalizacji parametrów procesu, zwłaszcza zaś ciśnienia uplastyczniania (ciśnienia wstecznego) bezpośrednio wpływającego na prędkość ruchu wstecznego ślimaka.

LITERATURA

1. Tadmor Z., Klein I.: „Engineering Principles of Plasticating Extrusion”, Wiley-Interscience, New York 1970.
2. Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
3. Maddock B. H., Smith D. J.: *SPE Journal* 1972, **28**, 12.
4. Rao N., Hagen K., Kramer A.: *Kunststoffe* 1979, **69**, 713.
5. Anders S., Brunner D., Jakob P.: *Plast. Kautsch.* 1980, **27**, 687.
6. Zavadsky E., Karnis J.: *Rheol. Acta* 1985, **24**, 556.
7. Tadmor Z., Klein I.: „Computer Programs for Plastics Engineers”, Reinhold Book Corp., New York 1968.
8. Agur E. E., Vlachopoulos J.: *Polym. Eng. Sci.* 1982, **22**, 1084.
9. Rao N.: „Computer Aided Design of Plasticating Screws”, Hanser Verlag, Munich 1986.
10. Wilczyński K.: *Polimery* 1986, **31**, 264.
11. Wilczyński K.: *Polimery* 1987, **32**, 383.
12. EXTRUD Scientific Process and Research (SPR), Somerset, New Jersey, USA.
13. Single Screw Designer (SSD), P. P. I., Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, USA.
14. REX, Institut für Kunststofftechnologie, University of Paderborn, Paderborn, Germany.
15. CEMEXTRUD, CEMEF, École des Mines, Sophia Antipolis, Valbonne, France.
16. EXTRUCAD, Vlachopoulos J., Silvi N., Vleck J.: *Japan Plast.* 1992, **43**, 21.
17. Wilczyński K.: „Teoria wytłaczania jednoślindakowego tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
18. Basov N. I., Kazankov Yu. V.: „Litevoe formovanie polimerov”, Chimija, Moskwa 1984.
19. Donovan R. C.: *Polym. Eng. Sci.* 1974, **14**, 101.
20. Lipshitz S. D.: Lavie R., Tadmor Z.: *Polym. Eng. Sci.* 1974, **14**, 553.

Otrzymano 4 IX 2007 r.