

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI¹⁾, JAMES L. WHITE²⁾

Modelowanie procesu wytłaczania dwuślimakowego

Cz. I. MODEL WYTŁACZANIA PRZECIWBIEŻNEGO

Streszczenie — Opracowano kompleksowy model matematyczny procesu dwuślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego. Opisuje on trzy obszary tego procesu, mianowicie transport tworzywa w stanie stałym, przebieg uplastyczniania oraz przepływ tworzywa uplastycznionego. Na podstawie modelu matematycznego zbudowano program komputerowy, umożliwiający symulację procesu. Symulację można prowadzić w różnych warunkach przetwórstwa, definiowanych charakterystyką tworzywa, charakterystyką geometryczną układu uplastyczniającego oraz parametrami technologicznymi procesu. Symulacja umożliwia prognozowanie przebiegu uplastyczniania tworzywa, rozkładu ciśnienia i temperatury oraz stopnia wypełnienia kanału ślimaka.

Słowa kluczowe: dwuślimakowe wytłaczanie przeciwbieżne, modelowanie komputerowe, prognozowanie przebiegu uplastyczniania tworzywa.

MODELING OF TWIN-SCREW EXTRUSION. PART I. A MODEL OF COUNTER-ROTATING EXTRUSION

Summary — A comprehensive mathematical model of the process of counter-rotating twin-screw extrusion (Fig. 1 and 2) has been developed. The model describes three areas of the process namely solid conveying, melting course and melt flow (Fig. 3 and 4). On the basis of mathematical model, the computer program enabling to simulate the process (Fig. 5) has been elaborated. The simulation can be done for various processing conditions, defined by characteristics of a polymer, by geometry of plasticization unit and technological parameters of the process. The simulation makes possible to predict the course of polymer melting, pressure and temperature profiles and screw channel filling degree (Fig. 6).

Key words: counter-rotating twin-screw extrusion, computer modeling, prediction of polymer melting course.

Podstawową różnicę między wytłaczarką jednoślimakową a dwuślimakową stanowi odmienny transport tworzywa: w wytłaczarce jednoślimakowej transport materiału ma wyłącznie charakter wleczony (*drag flow*), natomiast w wytłaczarce dwuślimakowej występuje również zjawisko wyporu (*positive displacement*). Udział mechanizmu wyporu zależy od stopnia zazębienia ślimaków i najpełniej występuje w przypadku wytłaczarek przeciwbieżnych zazębiających się całkowicie. Charakter przepływu w wytłaczarkach współbieżnych jest natomiast zbliżony do przepływu w wytłaczarkach jednoślimakowych.

Dobrze poznane i opisane w dziedzinie procesów przetwórstwa tworzyw są przepływy w stanie uplastycznionym. Znacznie gorzej jest rozumiany transport tworzywa w stanie stałym, a zwłaszcza przebieg jego uplastyczniania.

Odpowiednio dobrany model uplastyczniania stanowi więc podstawę budowy pełnego modelu procesu przetwórczego.

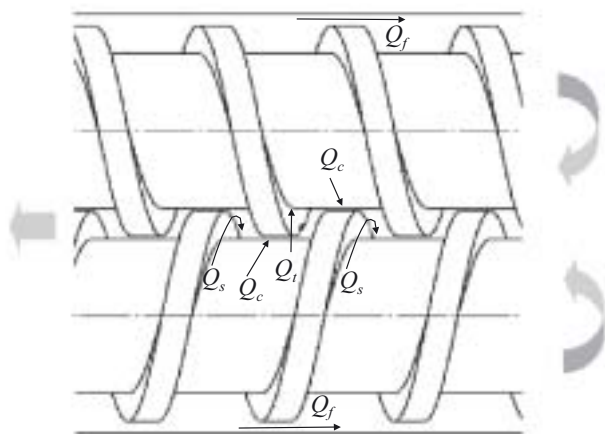
Gwałtowny rozwój teorii procesu wytłaczania jednoślimakowego nastąpił właśnie po opracowaniu przez Tadmora modelu uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce. Na tej podstawie powstał pierwszy program komputerowy symulacji takiego procesu [1].

Wytłaczanie dwuślimakowe natomiast jest procesem bardziej złożonym i słabiej poznanym, dotyczy to w szczególności wytłaczania przeciwbieżnego [2–6]. Rysunek 1 ilustruje schemat wytłaczania przeciwbieżnego a na rys. 2 pokazano charakterystyczną dla tego procesu komorę ślimakową w kształcie litery C.

W odniesieniu do wytłaczania współbieżnego w ostatnim czasie nastąpił znaczny postęp spowodowany opracowaniem odpowiednich modeli uplastyczniania tworzywa, stanowiących, jak już wspomniano, podstawę budowy pełnego modelu procesu przetwórczego. Do chwili obecnej na świecie są znane trzy modele komputerowe wytłaczania współbieżnego opracowane w zespołach prof. White'a — Akro-Co-Twin (USA), prof.

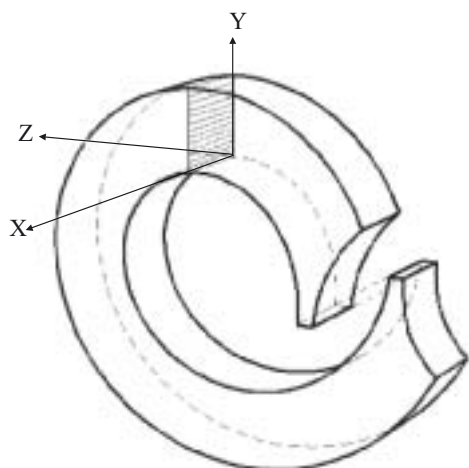
¹⁾ Politechnika Warszawska, Instytut Technologii Materiałowych, Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, ul. L. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: krzysztof.wilczynski@wip.pw.edu.pl

²⁾ The University of Akron, Department of Polymer Engineering, OH 44325-0301 Akron.



Rys. 1. Schemat dwuślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego o kierunkach odpowiadających matieżniom przepływu: Q_c — walcowego, Q_t — ciśnieniowego, Q_f — wierzchołkowego, Q_s — bocznego (por. też dalszy tekst)

Fig. 1. Scheme of counter-rotating twin-screw extrusion: Q_c — roll flow, Q_t — pressure flow, Q_f — top flow, Q_s — side flow (see also further text)



Rys. 2. Schemat komory ślimakowej w dwuślimakowej wytłaczarce przeciwbieżnej

Fig. 2. Scheme of screw chamber of counter-rotating twin-screw extruder

Potente — Sigma (Niemcy) i prof. Vergnesa — Ludovic (Francja). Warto tu przytoczyć kilka prac odnoszących się do wytłaczania współbieżnego [7—13], w tym prezentujących modele uplastyczniania tworzywa [10—13].

Przedmiotem niniejszego artykułu jest wytłaczanie przeciwbieżne. Wiedza i dane literaturowe dotyczące tego zagadnienia są nadzwyczaj ubogie. Praktycznie biorąc, wiadomo jedynie, że w wytłaczarce przeciwbieżnej, gdzie transport tworzywa odbywa się głównie wg mechanizmu wyporu [2—6, 14, 15] występuje wąski rozkład czasu przebywania tworzywa [16]. Przepływ tworzywa w stanie uplastycznionym był już przedmiotem modelowania [15, 17], przebieg zaś uplastyczniania materiału stanowił dotychczas tylko obiekt (nielicznych)

obserwacji [5, 18—21], a dopiero niedawno opracowano program symulacji tego procesu [22].

W pracy przedstawionej poniżej podjęto niezależną próbę opracowania matematycznego modelu wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego i na tej podstawie — oryginalnego komputerowego modelu procesu. Obejmuje on etap transportu tworzywa w stanie stałym, przebieg uplastyczniania oraz przepływ materiału w stanie uplastycznionym. Model umożliwia prognozowanie przebiegu wytłaczania na podstawie charakterystyki geometrycznej układu ślimakowego, warunków technologicznych procesu oraz właściwości przetwarzanego tworzywa. Stanowi więc narzędzie wspomaganie projektowania całego procesu. W celu potwierdzenia prawidłowości przyjętych założeń i uzyskanych rozwiązań przeprowadzono weryfikację doświadczalną modelu (por. Część II).

MODEL MATEMATYCZNY

Podstawowe założenia

Podstawę modelu stanowią wcześniejsze badania doświadczalne i teoretyczne uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce dwuślimakowej [20, 23]. Do oceny przebiegu uplastyczniania zastosowano technikę bezpośredniej obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka wytłaczarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (*Screw Pulling-out Technique*).

Zauważono, że w pobliżu zasobnika granulki polimeru są rozmieszczone wokół ślimaków i w wyniku ich ruchu obrotowego — swobodnie transportowane w kierunku głowicy. Zdecydowanie większa partia tworzywa przemieszcza się w dolnej części układu uplastyczniającego a tylko niewielka — w części górnej. W dolnej części układu granulki gromadzą się przy aktywnych ściankach zwoju ślimaków, tworząc warstwę nagrzewaną przez cylinder i zgniataną w szczelinie międzywalcowej. W efekcie takiego złożonego mechanizmu stała warstwa uplastycznia się.

Długość i szerokość stałej warstwy polimeru zmniejsza się wzdłuż osi ślimaków a uplastycznianie jest inicjowane w dwóch obszarach: na powierzchni styku granulatu ze ścianką cylindra i ściankami zwoju ślimaka (w



Rys. 3. Schemat przebiegu uplastyczniania tworzywa w dwuślimakowej wytłaczarce przeciwbieżnej

Fig. 3. Scheme of the process of polymer melting in counter-rotating twin-screw extruder

komorze kanału ślimaka) a także w szczelinie międzywalcowej. Rysunek 3 przedstawia schemat ideowy przebiegu uplastyczniania tworzywa.

W odniesieniu do tych dwóch obszarów uplastyczniania zaproponowano odrębne opisujące je modele matematyczne. W modelowaniu przyjęto przy tym, że polimer tworzy warstwę stałą przemieszczającą się wzdłuż ślimaków, wypełniając częściowo komory ślimakowe. Wciągany do szczeliny międzywalcowej granulat jest zgniatany, co generuje wysokie ciśnienie, w wyniku tarcia przebiega wówczas mechanizm uplastyczniania. Założono, że równocześnie uplastycznianie zachodzi od strony gorącego cylindra a na jego powierzchni tworzy się cienka warstewka tworzywa uplastycznionego.

W rozważaniach przyjęto także, że tworzywo jest transportowane głównie w dolnej części układu uplastyczniającego z całkowitym masowym natężeniem przepływu warstwy stałej (G_b) wyrażonym równaniem (1):

$$G_b = kG \quad (1)$$

gdzie: G — natężenie masowe przepływu tworzywa wprowadzanego do wytłaczarki (natężenie zasilania), k — udział masowy tworzywa transportowanego w dolnej części układu uplastyczniającego.

Wartość G_b można opisać również równaniem (2):

$$G_b = 2NV_c\rho_b \quad (2)$$

gdzie: ρ_b — gęstość nasypowa tworzywa stałego, N — szybkość obrotowa ślimaków, V_c — objętość warstwy stałej w komorze ślimakowej (czyli objętość wypełnionej tworzywem pojedynczej komory ślimaka),

przy czym

$$V_c = L_cWH \quad (3)$$

gdzie: L_c — długość warstwy stałej, W — szerokość warstwy stałej, H — wysokość warstwy stałej (głębokość kanału ślimaka).

Transport tworzywa w stanie stałym

Warstwa stała tworzywa przemieszcza się wzdłuż osi ślimaków w wyniku działania siły wywieranej przez ścianki zwoju ślimaka z prędkością równą

$$v_{s1} = Nt \quad (4)$$

gdzie: v_{s1} — prędkość warstwy stałej, t — skok ślimaka.

Ciśnienie w warstwie stałej generowane w szczelinie międzywalcowej można określić na podstawie bilansu sił (ΣF_{iz}) działających w objętości elementarnej tej warstwy (rys. 4). Przy założeniu izotropowego rozkładu naprężeń i pominięciu sił tarcia na ściankach zwoju ślimaka uzyskuje się poniższe zależności (objaśnienia symboli por. rys. 4):

$$\Sigma F_{iz} = -F_{s1} - F_{s2} + F_p - (F_p + F_{dp}) = 0 \quad (5)$$

$$F_{s1} = F_{s2} = f_s p W dz \quad (6)$$

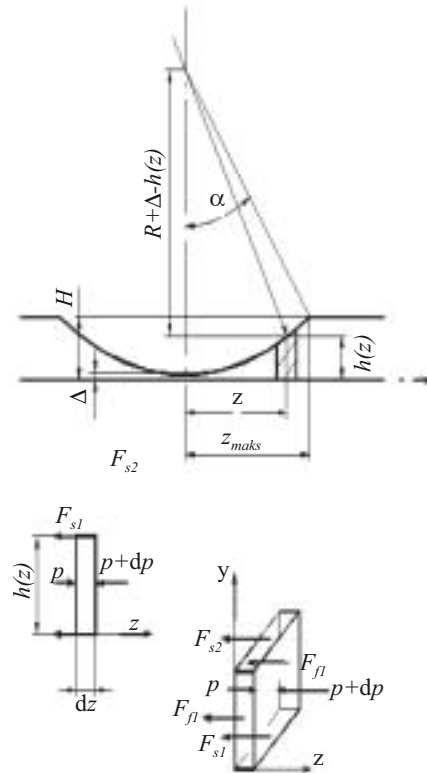
gdzie: f_s — współczynnik tarcia, p — ciśnienie, z — współrzędna w kierunku długości kanału ślimaka.

$$F_p = pWh \quad (7)$$

$$F_{p+dp} = (p+dp)Wh \quad (8)$$

gdzie: h — lokalna wysokość szczeliny międzywalcowej Δ równa

$$h = \Delta + R - \sqrt{R^2 - z^2} \quad (9)$$



Rys. 4. Siły działające w szczelinie międzywalcowej na elementarną objętość tworzywa: F_{s1} , F_{s2} , F_{f1} — siły tarcia wywierane przez ślimaki 1 i 2; F_p , F_{d+dp} — siły wynikające z gradientu ciśnienia w szczelinie międzywalcowej; objaśnienia innych symboli por. tekst

Fig. 4. Forces acting on element volume of polymer in a calendar gap: F_{s1} , F_{s2} , F_{f1} — friction forces given by screws 1 and 2; F_p , F_{d+dp} — forces resulted from the pressure gradient in a calendar gap; for another symbols — see text

Wartość h , po rozwinięciu w szereg członu $\sqrt{R^2 - z^2}$ i zachowaniu jedynie dwóch pierwszych wyrażen, można zapisać w postaci

$$h = \Delta + \frac{z^2}{2R} = \frac{a^2 + z^2}{2R} \quad (10)$$

gdzie: Δ — grubość szczeliny międzywalcowej, R — promień ślimaka.

Na podstawie równań (5)—(8) oraz (10) uzyskuje się:

$$\frac{dp}{p} = -4f_s R \frac{dz}{a^2 + z^2} \quad (11)$$

Po scałkowaniu (warunki brzegowe $p = p_\Delta$, $z = 0$) otrzymuje się zależność określającą rozkład ciśnienia w warstwie stałej tworzywa w szczelinie międzywalcowej:

$$p = p_\Delta \exp\left(-K_1 \arctg \frac{z}{a}\right) \quad (12)$$

gdzie:

$$K_1 = 2f_s \sqrt{\frac{2R}{\Delta}} \quad (13)$$

Uplastycznianie tworzywa

Jak już wspomniano, niedawno opracowany model uplastyczniania tworzywa w wylączarce przeciwbieżnej wyróżniał dwa obszary przebiegania procesu [20, 23].

Podstawowe znaczenie ma uplastycznianie w szczelinie międzywalcowej, gdzie granulat polimeru jest zginiatany i pod wpływem wytwarzającego się ciśnienia uplastycznione już tworzywo wypływa ze szczeliny w kierunku warstwy stałej.

Przyrost energii wewnętrznej granulatu wynika z pracy sił wzajemnego tarcia cząstek zgodnie z zależnością:

$$G_b \overline{\Delta H} \equiv \tau_{zx} (2\pi RN) WRS_{\Theta} \quad (14)$$

gdzie: $\overline{\Delta H}$ — entalpia właściwa, S_{Θ} — kąt określający powierzchnię kontaktową, τ_{zx} — naprężenia styczne wynikające z sił tarcia w szczelinie proporcjonalne do lokalnej wartości ciśnienia:

$$\tau_{zx} = f_s p \quad (15)$$

oraz

$$\overline{\Delta H} = c_m(T_f - T_m) + \lambda + c_s(T_m - T_s) \quad (16)$$

gdzie: c_m — ciepło właściwe tworzywa uplastycznionego, c_s — ciepło właściwe tworzywa w stanie stałym, λ — ciepło topnienia, T_f — temperatura uplastycznionego tworzywa, T_m — temperatura uplastyczniania, T_s — temperatura tworzywa w stanie stałym.

Na podstawie powyższych zależności można uzyskać równanie wyrażające temperaturę tworzywa w szczelinie międzywalcowej

$$T_f = T_m + \frac{\beta - \Lambda}{c_m} \quad (17)$$

gdzie:

$$\beta = \frac{f_s p}{\rho_m} \frac{RS_{\Theta}}{\Delta} \quad (18)$$

oraz

$$\Lambda = \lambda + c_s(T_m - T_s) \quad (19)$$

Uplastycznione tworzywo o temperaturze T_f wypływa ze szczeliny pod wpływem panującego tam ciśnienia z objętościowym natężeniem przepływu Q_p w kierunku nieuplastycznionej warstwy stałej. Z bilansu energii wynika, że:

$$\rho_m Q_p c_m (T_f - T_m) \equiv \rho_s W H \frac{dL}{dt} \Lambda \quad (20)$$

gdzie: dL/dt — szybkość uplastyczniania,

a po przekształceniu:

$$\frac{dL}{dt} = 2\pi N \frac{\Lambda_m}{\Lambda_s} R \frac{\Delta}{H} \quad (21)$$

gdzie:

$$\Lambda_m = \rho_m c_m (T_f - T_m) \quad (22)$$

$$\Lambda_s = \rho_s [c_s (T_m - T_s) + \lambda] \quad (23)$$

Przepływ tworzywa uplastycznionego

Przepływ uplastycznionego tworzywa w wylączarce przeciwbieżnej był przedmiotem prac Honga i White'a [17] analizujących płynięcie nienewtonowskie i nie-

izotermiczne. Ich model wykorzystano w publikacji [22]. W niniejszej pracy, do budowy kompleksowego modelu procesu przyjęliśmy, że w obszarze analizy przepływu tworzywa jest lokalnie newtonowski i izotermiczny, co oznacza, że lokalne wartości każdorazowo są określane w aktualnym obszarze analizy, w funkcji lokalnej temperatury i szybkości ścinania.

Objętościowe natężenie przepływu tworzywa w wylączarce przeciwbieżnej można przedstawić jako:

$$Q = Q_{th} - Q_1 \quad (24)$$

gdzie: Q_{th} — teoretyczna wartość objętościowego natężenia przepływu w obszarze całkowitego wypełnienia, wynikająca z charakterystyki geometrycznej ślimaka, Q_1 — natężenie objętościowe będące wypadkową przepływów przeciekowych (por. dalszy tekst).

Wartość Q_{th} wyraża się liczbą (i) wypełnionych tworzywem komór ślimaka (por. rys. 2), transportowanego w jednostce czasu $1/N$:

$$Q_{th} = 2iNV_c \quad (25)$$

Wyróżnia się trzy podstawowe przepływy przeciekowe (por. rys. 1), mianowicie: przepływ walcowy (z objętościowym natężeniem przepływu Q_c) między ślimakami (między rdzeniem jednego ślimaka, a wierzchołkami uzwojenia drugiego), przepływ ciśnieniowy wsteczny (z objętościowym natężeniem przepływu Q_t) przez czworościenną szczelinę między ściankami uzwojenia ślimaków oraz przepływ między wierzchołkami uzwojenia ślimaka a ścianką cylindra (z objętościowym natężeniem przepływu Q_f):

$$Q_1 = Q_c + Q_t + Q_f \quad (26)$$

Przepływy te można, odpowiednio, wyrazić następująco:

$$Q_c = \frac{4}{3}(t - ie) \left[\pi (D - H) \delta_c \cdot N + \frac{\delta_c^3}{3\eta_c \pi \sqrt{(D - H) \delta_c / 2}} \cdot \Delta p \right] \quad (27)$$

$$Q_t = 0,026 \left(\frac{H}{D} \right)^{1,8} \frac{\Psi^2 D^3}{\eta_p} \cdot \Delta p \quad (28)$$

$$Q_f = \frac{1}{2} (\pi - \alpha) D \delta_f t \cdot N + \frac{(\pi - \alpha) D \delta_f^3}{6\eta_f e} \cdot \Delta p \quad (29)$$

gdzie: e — szerokość zwoju ślimaka, D — średnica ślimaka, η_c , η_p , η_f — lokalne wartości lepkości, d_c , d_p , d_f — lokalne wartości grubości szczeliny, Ψ — kąt pochylenia ścianki zwoju ślimaka.

Całkowite objętościowe natężenie przepływu przeciekowego można ogólnie przedstawić także jako sumę natężeń przepływu wleczonego i ciśnieniowego:

$$Q_1 = AN + B\Delta p \quad (30)$$

gdzie: A — stała geometryczna wynikająca ze składowej wleczonej przepływów o natężeniach Q_c i Q_f , B — wielkość wynikająca ze stałych geometrycznych składowej Q_t przepływu ciśnieniowego wstecznego (o natężeniu Q_t) przepływów przeciekowych i lokalnych wartości lepkości.

Z przekształcenia równań (24) i (30) uzyskuje się wyrażenie określające zmianę ciśnienia w obrębie jednej komory ślimaka:

$$\Delta p = \frac{Q_{th} - Q - An}{B} \quad (31)$$

Rozkład temperatury można zaś uzyskać przez scałkowanie równania energii w postaci:

$$pc_p Q \frac{dT}{dz} = [h_b W_b (T_b - T) + h_s W_s (T_s - T)] + P - Q \frac{dp}{dz} \quad (32)$$

gdzie: P — strumień energii dostarczany do układu ślimakowego, T_b , T_s — temperatura, odpowiednio, cylindra i ślimaka, W_b , W_s — szerokość kanału ślimaka przy powierzchni cylindra i powierzchni rdzenia ślimaka, h_b , h_s — współczynniki przejmowania ciepła;

przy czym

$$P = [\sigma_{zy}(H)V_z + \sigma_{xy}(H)V_x]W_b \quad (33)$$

gdzie: σ_{zy} i σ_{xy} — naprężenia styczne.

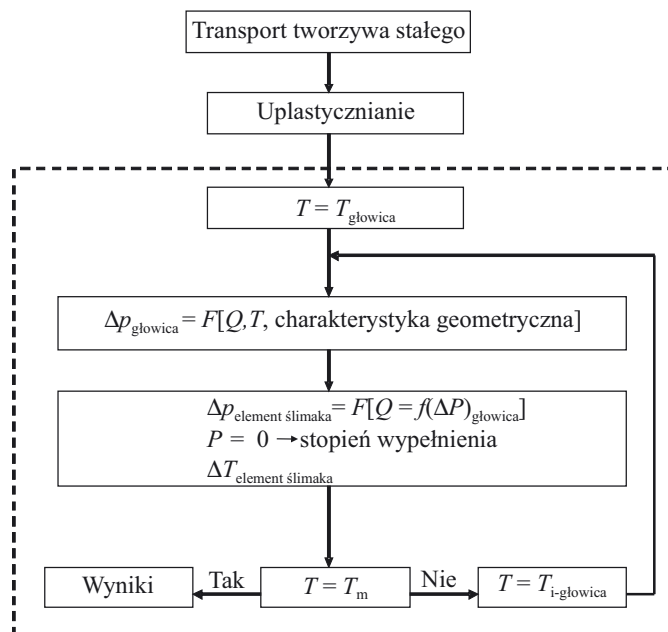
MODEL KOMPUTEROWY

Algorytm obliczeń

Jak już opisano powyżej, model procesu wytłaczania można budować na drodze odpowiedniego połączenia modeli elementarnych — transportu tworzywa w stanie stałym, uplastyczniania i przepływu tworzywa uplastycznionego. W tym celu zaproponowano następującą procedurę obliczeń (algorytm):

— W strefie tworzywa w stanie stałym określa się rozkład ciśnienia w szczelinie międzywalcowej, a na jego podstawie wykonuje obliczenia charakteryzujące przebieg uplastyczniania granulatu uwzględniając obydwa wspomniane obszary uplastyczniania. Szybkość uplastyczniania charakteryzuje długość ślimaka niezbędna do całkowitego uplastyczniania tworzywa.

— Podstawą obliczeń dotyczących przepływu tworzywa już uplastycznionego jest znana (w rozpatrywanym wytłaczaniu z dozowaniem) wartość natężenia przepływu tworzywa w wylotowej, która w połączeniu ze znajomością charakterystyki geometrycznej głowicy, przy wstępnym założeniu temperatury tworzywa u wylotu wylotowej, pozwala na określenie panującego w tym miejscu ciśnienia. Ciśnienie to jest równe spadkowi ciśnienia w głowicy wynikającemu z jej charakterystyki. Dane dotyczące przepływu tworzywa w układzie ślimakowym umożliwiają określenie gradientu ciśnienia w kanale ślimaka w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu tworzywa (*backward*). Gdy ciśnienie w układzie uplastyczniającym zmniejsza się do zera wówczas tworzywo nie wypełnia całej objętości kanału ślimaka a stopień wypełnienia kanału można określić na podstawie charakterystyki geometrycznej ślimaka. Płynięcie tworzywa jest związane z bilansem energii, tak więc obliczenia gradientu ciśnienia prowadzi się równocześnie z obliczeniami temperatury, „krok po kroku” w kierunku zasobnika. Temperatura u wylotu wylotowej uzyskiwana w wyniku obliczeń jest porównywana z rzeczywistą temperaturą uplastyczniania tworzywa mierzoną na końcu strefy uplastyczniania. Gdy porów-



Rys. 5. Algorytm obliczeń

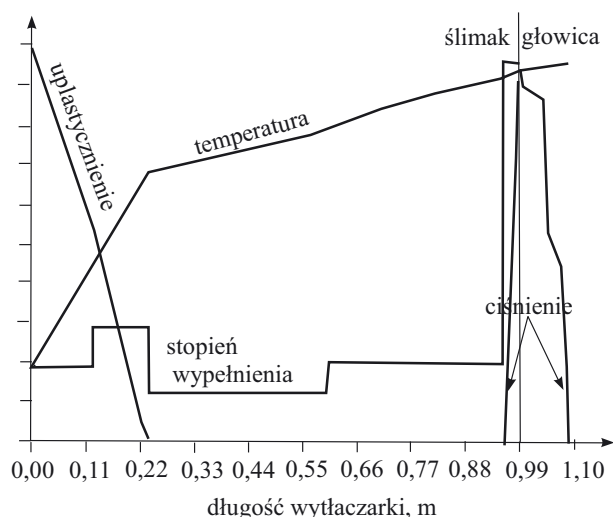
Fig. 5. Computation algorithm

nywane wartości różnią się, koryguje się wstępnie przyjętą temperaturę u wylotu wylotowej i obliczenia powtarza się aż do uzyskania zgodności. Postępowanie prowadzi się więc iteracyjnie, poszukując zbieżności obydwu wartości temperatury tworzywa. Algorytm obliczeń zastosowany w tej pracy przedstawia rys. 5; warto tu zwrócić uwagę, że model prezentowany w [22] opiera się na innym algorytmie.

Charakterystyka programu

Na podstawie przedstawionego modelu matematycznego i algorytmu obliczeń opracowano odpowiednie, oryginalne procedury obliczeniowe pozwalające na symulację procesu wytłaczania przeciwbieżnego. Zastosowany program komputerowy umożliwia prognozowanie przebiegu procesu, na drodze określania jego podstawowych parametrów takich jak rozkład ciśnienia i temperatury, przebieg uplastyczniania tworzywa oraz stopień wypełnienia kanału ślimaka. Dane wejściowe to specyfikacja tworzywa i charakterystyka geometryczna układu ślimakowego oraz warunki technologiczne procesu, czyli natężenie przepływu tworzywa, szybkość obrotowa ślimaka a także wartości temperatury.

Obliczenia w poszczególnych strefach wylotowej realizuje się w podprogramach opracowanych na podstawie modeli elementarnych procesu (modelu transportu tworzywa w stanie stałym, modelu uplastyczniania i modelu przepływu tworzywa uplastycznionego), „krok po kroku” wzdłuż długości układu ślimakowego. Postępowanie takie pozwala na przyjęcie założenia o stałości właściwości tworzywa w danym obszarze obliczeń (odcinku elementarnym). Wartości obliczone na



Rys. 6. Schematyczna zbiorcza charakterystyka procesu dwuślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego

Fig. 6. Schematic overall characteristics of counter-rotating twin-screw extrusion process

danym odcinku elementarnym stanowią dane wejściowe obliczeń w następnym obszarze.

Przyczynę tego, że podstawowe obliczenia realizuje się w sposób iteracyjny, stanowi wzajemna zależność równań ruchu i energii. Kryterium zbieżności obliczeń to, jak już wiadomo, zgodność obliczanej temperatury tworzywa z temperaturą uplastyczniania tworzywa na końcu strefy uplastyczniania.

Na rysunku 6 przedstawiono w sposób schematyczny wynikającą z obliczeń charakterystykę przebiegu procesu wytłaczania przeciwbieżnego. Program umożliwia więc określenie rozkładu ciśnienia i temperatury, wskazuje na stopień wypełnienia kanału ślimaka oraz opisuje przebieg uplastyczniania tworzywa. Warto przy tym podkreślić, że zgodnie z przyjętym algorytmem wzrost ciśnienia w układzie uplastyczniającym wytłaczarki jest równy spadkowi ciśnienia w głowicy. Wyraźne załamanie na krzywej rozkładu temperatury odpowiada końcowi uplastyczniania tworzywa. Obliczona temperatura zrównuje się wówczas z temperaturą jego uplastyczniania, co stanowi w omawianym programie kryterium zbieżności obliczeń iteracyjnych.

PODSUMOWANIE

Zbudowany na podstawie matematycznego modelu przeciwbieżnego wytłaczania odpowiedni algorytm obliczeń oraz wykorzystany program komputerowy umożliwiły pełną symulację tego procesu, pozwalając przy tym na prognozowanie przebiegu wytłaczania na pod-

stawie charakterystyki geometrycznej układu ślimakowego, warunków technologicznych procesu oraz właściwości przetwarzanego tworzywa. W zastosowanym modelu można określić przebieg uplastyczniania tworzywa, rozkład ciśnienia i temperatury oraz stopień wypełnienia kanału ślimaka.

W drugiej części artykułu przedstawimy wyniki weryfikacji modelu.

LITERATURA

1. Tadmor Z., Klein I.: „Engineering Principles of Plasticating Extrusion”, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1970.
2. Doboczky Z.: *Plastverarbeiter* 1965, **19**, nr 58, 395.
3. White J. L.: „Twin Screw Extrusion”, Hanser, Munich 1990.
4. White J. L., Potente H.: „Screw Extrusion”, Hanser, Munich 2001.
5. Janssen L. P. B. M.: „Twin Screw Extrusion”, Elsevier, New York 1978.
6. Schenkel G.: „Kunststoffe Extrudertechnik”, Hanser, Munich 1963.
7. Todd D. B.: *SPE Antec Tech. Papers* 1992, **38**, 2528.
8. Bawiskar S., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1995, **10**, 105.
9. Sakai T.: *Adv. Polym. Technol.* 1995, **14**, 277.
10. Potente H., Melish U.: *Int. Polym. Process.* 1996, **11**, 101.
11. Bawiskar S., White J. L.: *Polym. Eng. Sci.* 1998, **38**, 727.
12. Gogos C. C., Tadmor Z., Kim M. H.: *Adv. Polym. Technol.* 1998, **17**, 284.
13. Vergnes B. i in.: PPS-15 Annual Meeting, materiały, Hertogenbosch 1999.
14. White J. L., Adewale A.: *Int. Polym. Process.* 1993, **8**, 210.
15. Hong M. H., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1998, **13**, 342.
16. Shon K., Chang D., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1999, **14**, 44.
17. Hong M. H., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1999, **14**, 136.
18. Lim S., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1994, **9**, 3.
19. Cho J. W., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1996, **11**, 21.
20. Wilczyński K., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 2001, **16**, 257.
21. Wang D., Min K.: *Polym. Eng. Sci.* 2005, **45**, 998.
22. Wilczyński K., Jiang J. L., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 2007, **22**, 198.
23. Wilczyński K., White J. L.: *Polym. Eng. Sci.* 2003, **43**, 1715.

Otrzymano 21 VI 2007 r.