

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI<sup>\*)</sup>, ADRIAN LEWANDOWSKIPolitechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji  
Instytut Techniki Wytwarzania  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

## Modelowanie przepływu tworzyw w procesie wytłaczania dwoślimakowego przeciwbieżnego

### Cz. I. SYMULACJA PRZEPŁYWU

**Streszczenie** — Na podstawie opracowanego wcześniej, kompleksowego matematycznego modelu procesu dwoślimakowego wytłaczania przeciwbieżnego, z wykorzystaniem analizy numerycznej MES (metody elementów skończonych) przygotowano komputerowy program umożliwiający symulację przepływu tworzywa uplastycznionego w kanale ślimaka. Symulację prowadzono w różnych warunkach przetwórstwa definiowanych charakterystyką tworzywa, charakterystyką geometryczną układu uplastyczniającego oraz parametrami technologicznymi procesu wytłaczania. Wyniki modelowania przedstawiono w postaci zależności bezwymiarowego natężenia przepływu tworzywa i bezwymiarowego gradientu ciśnienia.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie dwoślimakowe przeciwbieżne, modelowanie komputerowe, metoda elementów skończonych.

MODELLING OF THE POLYMER MELT FLOW IN A COUNTER-ROTATING TWIN-SCREW EXTRUSION PROCESS. Part I. THE SIMULATION OF MELT FLOW

**Summary** — A computer program for the simulation of polymer melt flow has been developed on the basis of an earlier composite mathematical model calculated with the application of numerical Finite Element Method (FEM) for a counter-rotating twin-screw extrusion process (Figs. 1–3). The simulation was performed for various processing conditions defined by the material characteristics, screw geometry and technological parameters of the extrusion process. The modelling results were presented as a function of dimensionless melt flow rate as well as dimensionless pressure gradient (Figs. 4–13).

**Keywords:** twin-screw counter-rotating extrusion, computer modeling, finite element method.

Wiedza dotycząca wytłaczania dwoślimakowego jest znacznie mniejsza niż na temat wytłaczania jednoślimakowego. Słabo poznany jest zwłaszcza proces wytłaczania przeciwbieżnego [1–7]. Wiadomo, że w wytłaczarce przeciwbieżnej podstawowy mechanizm przepływu stanowi mechanizm wyporu („*positive displacement*”) [1–7] oraz że generuje on wąski rozkład czasu pobytu tworzywa w kanale wytłaczarki [8]. Przepływ tworzywa w stanie uplastycznionym modelowano już w latach dziewięćdziesiątych [9–12], natomiast przebieg uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce przeciwbieżnej do niedawna był przedmiotem tylko nielicznych badań [3, 13, 14]. Z tego względu nie było też całościowego modelu tego procesu.

Dopiero w ostatnich latach, w efekcie systematycznie przeprowadzonych prac, Wilczyński i White zaproponowali mechanizm i model uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce przeciwbieżnej [15, 16]. Badania wykonano z zastosowaniem techniki bezpośredniej obserwacji próbek tworzywa, zdjętych ze ślimaka wytłaczarki po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (*Screw Pulling-out Technique*) [17]. Inną metodę przeprowadzenia doświadczeń zaproponowali ostatnio Wang i Min [18].

Na podstawie wyników badań uplastyczniania tworzywa opracowano pierwszy całościowy model procesu wytłaczania przeciwbieżnego [19], stanowiący punkt wyjścia do budowy programu komputerowego Akro-Counter-Twin, stworzonego na Uniwersytecie w Akron (The University of Akron, OH, USA). Uplastycznianie opisano tam korzystając z modelu Wilczyńskiego i White’a [16], natomiast przepływ tworzywa uplastycznionego z uwzględnieniem prac Honga i White’a [11, 12].

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji: e-mail: krzysztof.wilczynski@wip.pw.edu.pl

Niezależnie, przedstawiono także odrębny całościowy model wytłaczania przeciwbieżnego [20, 21], w którym opis uplastyczniania jest podobny, charakterystyka przepływu tworzywa uplastycznionego jest natomiast uproszczona.

Te jedyne jak dotąd, kompleksowe modele procesu wytłaczania przeciwbieżnego, do opisu przepływu tworzywa uplastycznionego nie wykorzystują możliwości obliczeniowych metody elementów skończonych ze względu na dużą złożoność i różnorodność zjawisk zachodzących w procesie wytłaczania (transport tworzywa w stanie stałym, uplastycznianie tworzywa, przepływ tworzywa uplastycznionego), nieliniowość modeli reologicznych przetwarzanych materiałów, skomplikowaną geometrię przepływu i niestabilny charakter tego przepływu. Stosowanie metody elementów skończonych jest trudne i czasochłonne, dlatego też niechętnie wykorzystuje się ją do całościowego modelowania procesu wytłaczania. Warta uwagi jest zatem koncepcja zastosowania do całościowego modelowania procesów ślimakowych, metody MES polegającej na budowie bezwymiarowych charakterystyk przepływu ślimakowego, definiujących zależności bezwymiarowego natężenia przepływu tworzywa i bezwymiarowego gradientu ciśnienia [22].

Zależności te, uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych MES, można zapisać w postaci związków regresyjnych, które następnie można implementować do całościowego modelu procesu. W rezultacie uzyskuje się rozwiązania zapewniające dużą dokładność obliczeń w rozsądnym czasie i w sposób przyjazny (przystępny) użytkownikowi.

W poniższym artykule przedstawiono próbę modelowania MES przepływu tworzywa w wylączarce przeciwbieżnej i wykorzystania uzyskanych wyników obliczeń do całościowej symulacji procesu. Modelowanie wykonano za pomocą programu obliczeniowego mechaniki płynów (*Computational Fluids Dynamics, CFD*) Polyflow-Fluent [23]. Jest to ogólnie zorientowany, komputerowy pakiet obliczeniowy, przeznaczony do symulacji procesów, w których dominującą rolę odgrywają przepływy lepkie i lepkosprężyste, a mogą to być przepływy dwu- lub trójwymiarowe, ustalone lub niestalone, izotermiczne lub nieizotermiczne.

## MODELOWANIE MES

### Przepływ tworzywa uplastycznionego

Przepływ tworzywa uplastycznionego opisano w pracach White'a, Adewale'a i Honga w sposób analityczny, jako przepływ newtonowski i izotermiczny [9], a następnie w sposób numeryczny, jako przepływ ni-newtonowski i nieizotermiczny [11, 12]. W swoich pracach autorzy zaproponowali zmodyfikowaną metodę FAN (*Flow Analysis Network*), umożliwiającą dwuwymiarowy opis przepływu w procesie wytłaczania przeciwbieżnego.

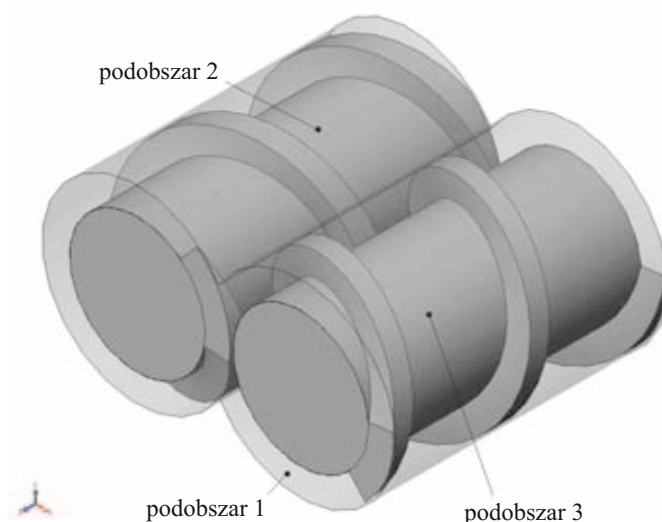
### Technika modelowania MES

Przepływ tworzywa w wylączarce dwuślimakowej przeciwbieżnej jest trójwymiarowy i niestabilny (ze względu na obracające się ślimaki). W podjętej próbie modelowania takiego przepływu za pomocą programu Polyflow-Fluent zastosowano nową technikę nakładania siatki elementów skończonych, tzw. technikę superpozycji siatki (*Mesh Superposition Technique, MST*) [24, 25], zwłaszcza przydatną w modelowaniu przepływów w obecności ruchomych i ząbiających się elementów, takich jak w wylączarkach dwuślimakowych.

W przypadku wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego siatka jest generowana dla trzech podobszarów przepływu (*Subdomains*): wnętrza cylindra (podobszar 1, przestrzeń między ścianką cylindra a rdzeniem ślimaka, bez uzwojenia ślimaka) i dwóch ślimaków (podobszary 2 i 3, uzwojenie ślimaków). W każdym kroku obliczeń (chwili czasu) algorytm MST uaktualnia i odnawia parametry geometryczne ślimaków, gdyż kolidują one z parametrami geometrycznymi przepływu. Kształt geometryczny układu dwuślimakowego przeciwbieżnego z trzema wyróżnionymi podobszarami przepływu przedstawiono na rys. 1.

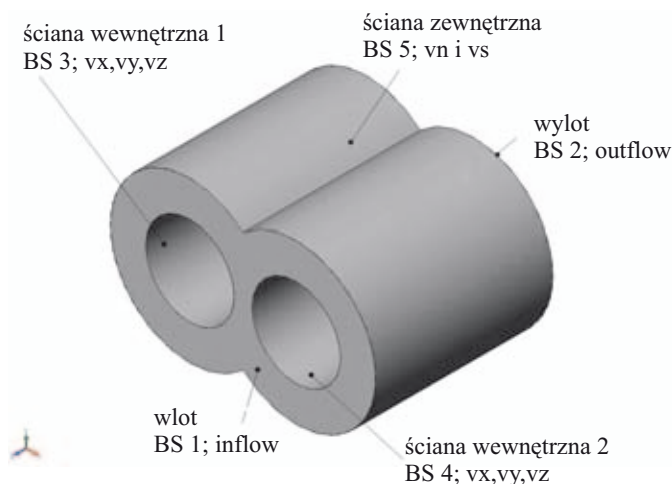
Rozwiązywanie różnych zagadnień modelowania przepływu w programie Polyflow-Fluent wymaga sformułowania odpowiednich warunków brzegowych i początkowych w odniesieniu do równań ruchu i energii, przy założonym modelu reologicznym materiału.

Rozpatrywany przepływ w procesie wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego jest ograniczony pięcioma granicami i do jego modelowania jest konieczne określenie na tych granicach pięciu różnych warunków brzegowych (rys. 2). Granicami są: [BS1] – wlot do przestrzeni przepływu, [BS2] – wylot z przestrzeni przepływu



Rys. 1. Schemat przestrzeni przepływu w procesie wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego

Fig. 1. Flow domains in a counter-rotating twin-screw extrusion



Rys. 2. Warunki brzegowe przepływu w procesie wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego

Fig. 2. Boundary conditions in a counter-rotating twin-screw extrusion

wu, [BS3] – wewnętrzna powierzchnia przestrzeni przepływu (powierzchnia rdzenia pierwszego ślimaka), [BS4] – wewnętrzna powierzchnia przestrzeni przepływu (powierzchnia rdzenia drugiego ślimaka), [BS5] – zewnętrzna powierzchnia przestrzeni przepływu (powierzchnia ścianki cylindra).

Doboru warunków brzegowych zdefiniowanych w programie Polyflow-Fluent dokonuje się w zależności od typu sformułowanego zagadnienia [22, 25].

Przyjęto:

[BS1] – warunek **inflow**, definiujący istnienie w pełni rozwiniętego przepływu na rozpatrywanej granicy oraz zerowanie się składowej poprzecznej prędkości (w stosunku do kierunku przepływu); realizowany w wyniku podania wartości objętościowego natężenia przepływu materiału:  $\mathbf{Qin} = \mathbf{Qo}$ ; warunek ten oznacza, że w przepływie wystąpi generacja ciśnienia;

[BS2] – warunek **outflow**, definiujący zachowanie ciągłości warunków przepływu u wylotu z obszaru przepływu i ustalający zanikanie składowej normalnej gęstości siły (naprężenia) oraz składowej poprzecznej prędkości (w stosunku do kierunku przepływu); warunek, łącznie z warunkiem BS1 oznacza, że w przepływie wystąpi generacja ciśnienia:  $\mathbf{fn} = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{vs} = \mathbf{0}$ ;

[BS3] – warunek **cartesian velocity imposed (vx & vy & vz)**, dopuszczający istnienie sztywnego przesunięcia lub obrotu (względem osi obrotu) rozpatrywanej granicy; przyjęty warunek obrotu wymaga zdefiniowania współrzędnych osi obrotu dla pierwszego ślimaka i podania prędkości kątowej:  $\omega = \mathbf{N}$ ;

[BS4] – warunek **cartesian velocity imposed (vx & vy & vz)**, dopuszczający istnienie sztywnego przesunięcia lub obrotu (względem osi obrotu) rozpatrywanej granicy; przyjęty warunek obrotu wymaga zdefiniowania współrzędnych osi obrotu dla drugiego ślimaka i podania prędkości kątowej:  $\omega = -\mathbf{N}$ ;

[BS5] – warunek **normal and tangential velocities imposed (vn & vs)**, definiujący istnienie lub zanikanie na rozpatrywanej granicy przepływu składowych prędkości normalnej i stycznej; przyjęty warunek oznacza, że granicę stanowi ściana, na której nie występuje poślizg:  $\mathbf{vn} = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{vs} = \mathbf{0}$ .

Rozpatrywane zagadnienie przepływu w wytłaczarce dwuślimakowej przeciwbieżnej zdefiniowano jako trójwymiarowy (3D), uogólniony przepływ newtonowski.

Równanie uogólnionej cieczy newtonowskiej ma postać [22]:

$$\tau = \eta (\mathbf{II}_{2D}) 2D \quad (1)$$

gdzie:  $\tau$  – tensor extra-naprężenia,  $\eta$  – lepkość,  $\mathbf{II}_{2D} = 2D:2D$  – drugi niezmiennik tensora prędkości odkształcenia  $2D$ ,  $D$  – tensor prędkości odkształcenia.

Lepkość wyraża się tutaj jako funkcja drugiego niezmiennika tensora prędkości odkształcenia  $\eta = \eta(\mathbf{II}_{2D})$ . Zwykle korzysta się z funkcji tzw. uogólnionej szybkości ścinania ( $\dot{\gamma}_D$ ), tzn.  $\eta = \eta(\dot{\gamma}_D)$ , gdzie szybkość ta jest definiowana wzorem:

$$\dot{\gamma}_D = \mathbf{II}_{2D}^{1/2} \quad (2)$$

Przyjęto model potęgowej cieczy (*power law*), w którym lepkość jest wyrażona w funkcji uogólnionej szybkości ścinania  $\dot{\gamma}_D$  jako:

$$\eta(\dot{\gamma}_D) = m \dot{\gamma}_D^{n-1} \quad (3)$$

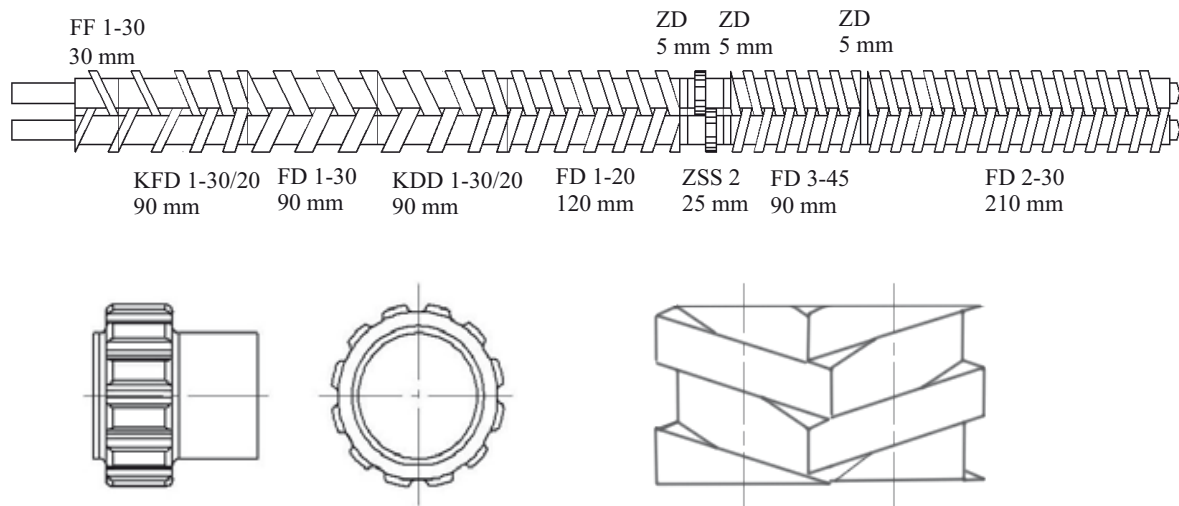
gdzie:  $m$ ,  $n$  – parametry równania;  $m$  – współczynnik konsystencji ( $N s^n/m^2$ ),  $n$  – wykładnik płynięcia (bezwymiarowy).

## Program badań

Program obejmował modelowanie przepływu tworzywa w warunkach odpowiadających warunkom niezależnie wykonanych badań doświadczalnych procesu. Wyniki doświadczeń zostaną przedstawione w drugiej części artykułu, gdzie posłużą do oceny proponowanego rozwiązania zagadnienia modelowania procesu wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego.

W badaniach zastosowano układ ślimakowy pokazany na rys. 3. Ta konfiguracja ślimaków zawiera 3 różne elementy konstrukcyjne, mianowicie: elementy ściśle zazębiające się, luźno zazębiające się i ścinające. Wytłaczanym materiałem był polietylen małej gęstości (Basell Orlen, Purell 3020D, gęstość właściwa  $\rho = 0,927 \text{ g/cm}^3$ , wskaźnik szybkości płynięcia  $MFR = 0,3 \text{ g/10 min}$  ( $190 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $2,16 \text{ kg}$ ) i temperatura topnienia  $T_m = 114 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Badania przeprowadzono w warunkach: dozowanego zasilania, różnej wartości natężenia przepływu tworzywa:  $Q = 4 \text{ kg/h}$  i  $Q = 8 \text{ kg/h}$  oraz w warunkach zasilania bez dozowania i różnych prędkości obrotowych ślimaka  $N = 40 \text{ obr/min}$  i  $N = 80 \text{ obr/min}$ .

Modelowanie wykonano w takich samych warunkach. Obliczenia odnosiły się do elementu ściśle zazębiającego się (FD), znajdującego się w końcowej części ukła-

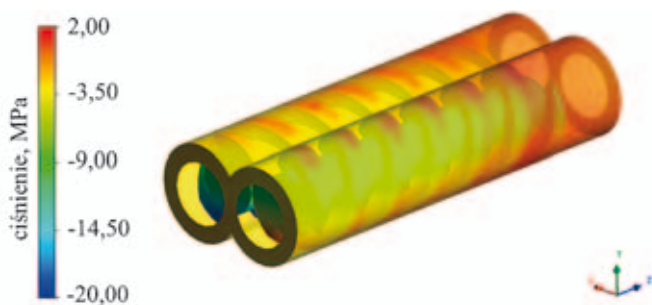


Rys. 3. Układ przeciwbieżny ślimaków: a) ZSS — element ścinający, b) FD — element ściśle zazębiający się  
 Fig. 3. Configuration of the counter-rotating twin screws: a) ZSS — shearing element, b) FD — thick flighted element

du ślimakowego oraz elementu ścinającego (ZSS). Przepływ w tych elementach zachodzi przy całkowitym wypełnieniu cylindra wytłaczarki i w tej przestrzeni jest generowane ciśnienie. Obliczenia umożliwiają określenie charakterystyki tego przepływu.

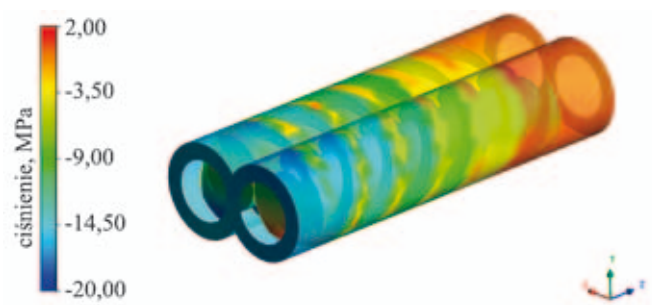
#### WYNIKI MODELOWANIA

Przykładowe wyniki modelowania w postaci bezwymiarowych charakterystyk przepływu ślimaków, definiujących zależności bezwymiarowego natężenia prze-



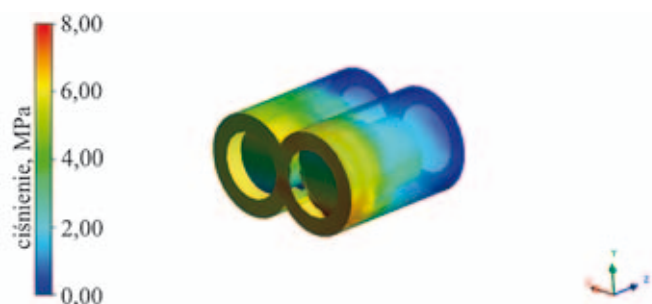
Rys. 4. Rozkład ciśnienia w elemencie ściśle zazębiającym się ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 40 \text{ obr/min}$ )

Fig. 4. Pressure profile for the thick-flighted element ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 40 \text{ rpm}$ )



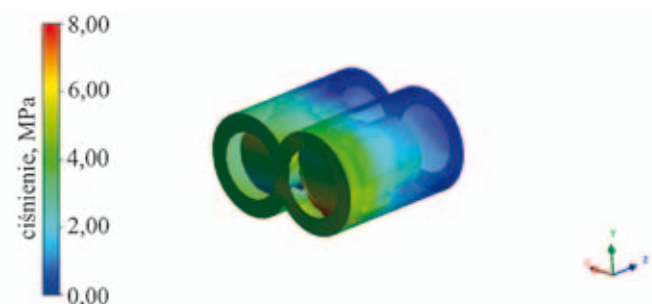
Rys. 6. Rozkład ciśnienia w elemencie ściśle zazębiającym się ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ obr/min}$ )

Fig. 6. Pressure profile for the thick-flighted element ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ rpm}$ )



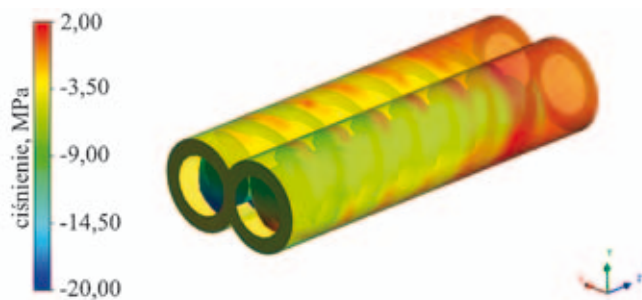
Rys. 5. Rozkład ciśnienia w elemencie ścinającym ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 40 \text{ obr/min}$ )

Fig. 5. Pressure profile for the shearing element ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 40 \text{ rpm}$ )



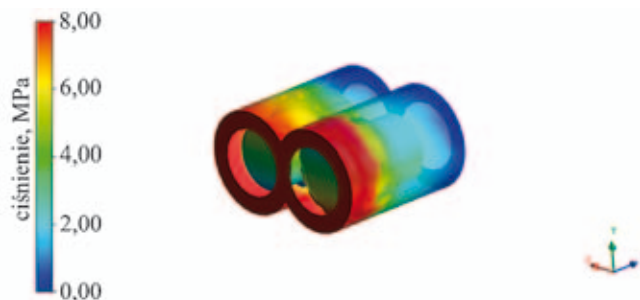
Rys. 7. Rozkład ciśnienia w elemencie ścinającym ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ obr/min}$ )

Fig. 7. Pressure profile for the shearing element ( $Q = 4 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ rpm}$ )



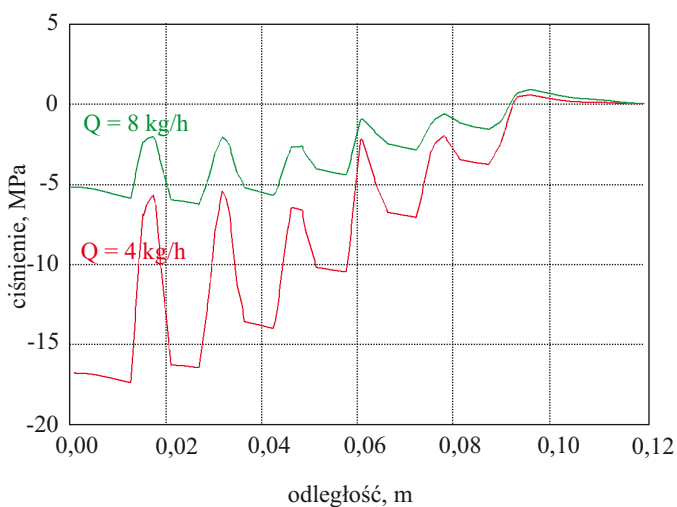
Rys. 8. Rozkład ciśnienia w elemencie ściśle ząbującym się ( $Q = 8 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ obr/min}$ )

Fig. 8. Pressure profile for the thick-flighted element ( $Q = 8 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ rpm}$ )



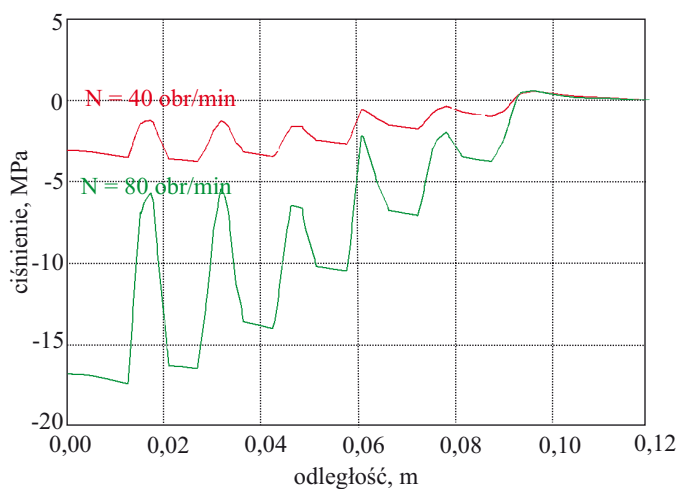
Rys. 9. Rozkład ciśnienia w elemencie ścinającym ( $Q = 8 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ obr/min}$ )

Fig. 9. Pressure profile for the shearing element ( $Q = 8 \text{ kg/h}$ ,  $N = 80 \text{ rpm}$ )



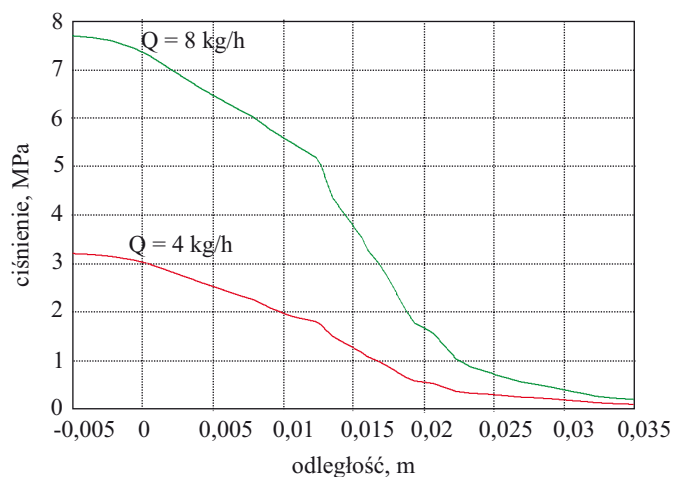
Rys. 10. Wpływ natężenia przepływu tworzywa na rozkład ciśnienia w elemencie ściśle ząbującym się w warunkach stałej szybkości obrotowej  $N = 80 \text{ obr/min}$

Fig. 10. Influence of flow rate on the pressure profile for the thick-flighted element at constant screw speed  $N = 80 \text{ rpm}$



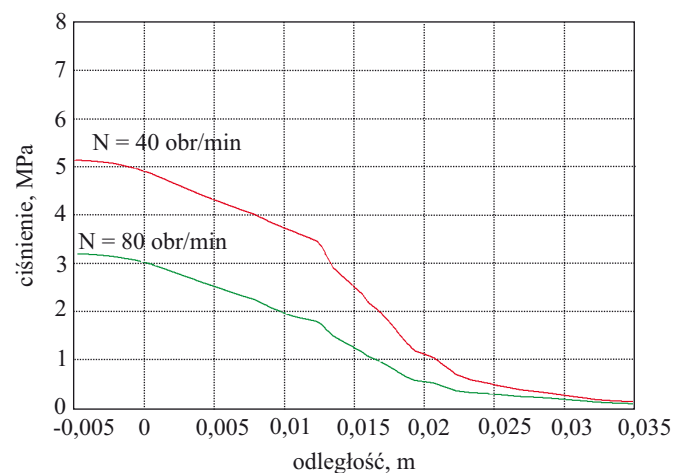
Rys. 12. Wpływ prędkości obrotowej ślimaków na rozkład ciśnienia w elemencie ściśle ząbującym się w warunkach stałego natężenia przepływu  $Q = 4 \text{ kg/h}$

Fig. 12. Influence of screw rotational speed on the pressure profile for the thick-flighted element at constant flow rate  $Q = 4 \text{ kg/h}$



Rys. 11. Wpływ natężenia przepływu tworzywa na rozkład ciśnienia w elemencie ścinającym w warunkach stałej szybkości obrotowej  $N = 80 \text{ obr/min}$

Fig. 11. Influence of flow rate on the pressure profile for the shearing element at constant screw speed  $N = 80 \text{ rpm}$



Rys. 13. Wpływ prędkości obrotowej ślimaków na rozkład ciśnienia w elemencie ścinającym w warunkach stałego natężenia przepływu  $Q = 4 \text{ kg/h}$

Fig. 13. Influence of screw rotational speed on the pressure profile for the shearing element at constant flow rate  $Q = 4 \text{ kg/h}$

plywu tworzywa i bezwymiarowego gradientu ciśnienia przedstawiono na rys. 4–13.

Rysunki 4–9 ilustrują rozkład ciśnienia w elemencie ściśle zazębającym się oraz w elemencie ścinającym, w różnych warunkach natężenia przepływu i prędkości obrotowej ślimaków.

Warto zwrócić uwagę na charakterystyczną w przypadku przepływów ślimakowych pulsację ciśnienia (tzw. „piłę ciśnienia”), z właściwym dla niej wzrostem ciśnienia w obszarze zwoju i spadkiem ciśnienia w przestrzeni kanału ślimaka. Pulsacja taka jest wynikiem zmieniających się parametrów geometrycznych ślimaka w danym obszarze analizy. W określonym punkcie przestrzeni przepływu pojawiają się bowiem na przemian zwój i kanał ślimaka, co generuje pulsację ciśnienia. To zjawisko jest nieodłączną i zawsze występującą cechą przepływów ślimakowych, jak również przyczyną pulsacji wydajności procesu wytłaczania. Częstotliwość pulsacji wydajności jest równa częstotliwości obrotów ślimaka (prędkości obrotowej).

Rysunki 10 i 11 obrazują wpływ natężenia przepływu tworzywa na rozkład ciśnienia w elemencie ściśle zazębającym się oraz w elemencie ścinającym, w warunkach stałej prędkości obrotowej ślimaków  $N = 80$  obr/min, a na rys. 12 i 13 wpływ prędkości obrotowej ślimaka na rozkład ciśnienia, przy stałym natężeniu przepływu  $Q = 4$  kg/h.

Natężenie przepływu tworzywa w wytłaczarce przeciwbieżnej można przedstawić jako:

$$Q = Q_{th} - Q_1 \quad (4)$$

gdzie:  $Q_{th}$  – teoretyczna wartość natężenia przepływu w obszarze całkowitego wypełnienia wynikająca z objętości komory ślimaka,  $Q_1$  – wypadkowa przepływów przeciekowych.

Teoretyczne natężenie przepływu  $Q_{th}$  można wyrazić liczbą komór ślimaka wypełnionych tworzywem transportowanym w jednostce czasu  $1/N$ . Wówczas:

$$Q_{th} = 2iNV_c \quad (5)$$

gdzie:  $i$  – liczba komór ślimaka,  $N$  – prędkość obrotowa ślimaków,  $V_c$  – objętość komory ślimaka.

Wyróżnia się trzy podstawowe przepływy przeciekowe: przepływ walcowy między ślimakami (między rdzeniem jednego a wierzchołkami uzwojenia drugiego ślimaka), przepływ ciśnieniowy wsteczny przez czworosieczną szczelinę między ściankami uzwojenia ślimaków i przepływ między wierzchołkami uzwojenia ślimaka a ścianką cylindra:

$$Q_1 = Q_c + Q_t + Q_f \quad (6)$$

gdzie:  $Q_c$  – przepływ walcowy,  $Q_t$  – przepływ ciśnieniowy,  $Q_f$  – przepływ wierzchołkowy.

Całkowity przepływ przeciekowy można ogólnie przedstawić jako sumę przepływu wlezonego i ciśnieniowego:

$$Q_1 = AN + B\Delta p \quad (7)$$

gdzie:  $\Delta p$  – zmiana ciśnienia w obrębie jednej komory,  $A$  – stała geometryczna wynikająca ze składowej wlezonej przepływu walcowego i przepływu wierzchołkowego,  $B$  – wielkość wynikająca ze stałych geometrycznych składowej ciśnienia przepływów przeciekowych i lokalnej lepkości.

Po przekształceniu równań (4) i (7) uzyskuje się wyrażenie określające zmianę ciśnienia w obrębie jednej komory ślimaka:

$$\Delta p = \frac{Q_{th} - Q - AN}{B} \quad (8)$$

lub korzystając ze wzoru (5), przy założeniu  $i = 1$ :

$$\Delta p = \frac{N(2V_c - A) - Q}{B} \quad (9)$$

Analiza zależności (8) i (9) umożliwia interpretację zmian ciśnienia w elementach ściśle zazębających się ślimaków. Ze wzrostem natężenia przepływu  $Q$  (z 4 kg/h do 8 kg/h), przy stałej prędkości obrotowej ślimaka (rys. 10), zmniejsza się gradient ciśnienia (dodatni). Stała prędkość obrotowa ślimaków oznacza, że podstawowy przepływ w procesie wytłaczania dwuślimakowego przeciwbieżnego, tzn. przepływ komorowy  $Q_{th}$  oraz część wleczona przepływu przeciekowego nie zmieniają się. Tak więc, wzrost natężenia przepływu powoduje zmniejszanie się gradientu ciśnienia.

Zwiększanie prędkości obrotowej ślimaka (z 40 obr/min do 80 obr/min), przy stałym natężeniu przepływu (rys. 12), powoduje wzrost przepływu komorowego  $Q_{th}$  oraz części wlezonej przepływu przeciekowego. Przy stałym natężeniu przepływu  $Q$ , oznacza to wyższy gradient ciśnienia (dodatni).

W przypadku elementu ścinającego interpretacja jest dosyć oczywista. Ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa gradient ciśnienia rośnie, co jest typowe dla przepływów ciśnieniowych (rys. 11). Natomiast, ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka gradient ciśnienia zmniejsza się, gdyż rośnie szybkość ścinania, a więc maleje lepkość tworzywa (rys. 13).

## PODSUMOWANIE

Opracowano metodykę a następnie wykonano modelowanie przepływu tworzywa w wytłaczarce przeciwbieżnej, w rzeczywistej trójwymiarowej przestrzeni, w warunkach przepływu nienewtonowskiego. Wyniki implementowane do drugiej części artykułu posłużą do opracowania kompleksowego modelu procesu wytłaczania przeciwbieżnego.

## LITERATURA

1. Schenkel G.: „Kunststoffe Extrudertechnik“, Hanser, Munich 1963.
2. Doboczky Z.: *Plastverarbeiter* 1965, 16, 58.
3. Janssen L. P. B. M.: „Twin Screw Extrusion“, Elsevier, New York 1978.
4. White J. L.: „Twin Screw Extrusion“, Hanser, Munich 1990.

5. White J. L., Potente H.: „Screw Extrusion”, Hanser, Munich 2001.
6. Rauwendaal Ch.: „Polymer Extrusion”, Hanser, Munich 2001.
7. Tadmor Z., Gogos C.: „Principles of Polymer Processing”, Wiley, New York 2006.
8. Shon K., Chang D., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1999, **14**, 44.
9. White J. L., Adewale A.: *Int. Polym. Process.* 1993, **8**, 210.
10. Li T., Manas-Zloczower L.: *Polym. Eng. Sci.* 1994, **34**, 551.
11. Hong M. H., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1998, **13**, 342.
12. Hong M. H., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1999, **14**, 136.
13. Lim S., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1994, **9**, 3.
14. Cho J. W., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 1996, **11**, 21.
15. Wilczyński K., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 2001, **16**, 257.
16. Wilczyński K., White J. L.: *Polym. Eng. Sci.* 2003, **43**, 1715.
17. Tadmor Z., Klein I.: „Engineering Principles of Plasticating Extrusion”, New York, Van Nostrand Reinhold Company 1970.
18. Wang D., Min K.: *Polym. Eng. Sci.* 2005, **45**, 998.
19. Wilczyński K., Jiang J. L., White J. L.: *Int. Polym. Process.* 2007, **22**, 198.
20. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2008, **53**, 754.
21. Wilczyński K., White J. L.: *Polimery* 2009, **54**, 51.
22. Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
23. [www.fluent.com/software/polyflow](http://www.fluent.com/software/polyflow)
24. Avalosse Th., Rubin Y., Fondin L.: *J. Reinf. Plast. Compos.* 2002, **21**, 419.
25. Polyflow v.3.10.4, Users Guide, Polyflow s.a., Louvain-la-Neuve 2008.

Otrzymano 14 X 2009 r.