

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI, ZBIGNIEW SZYMANIAK, ANDRZEJ NASTAJ

Politechnika Warszawska, Instytut Technologii Materiałowych  
Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

## Modelowanie wytłaczania wielowarstwowego tworzyw

### CZ. I. PRZEPŁYWY LEPKIE

#### MODELING OF PLASTICS COEXTRUSION. Part I. VISCOUS FLOWS

**Summary** — A method of modeling of free multilayer forming problem occurring in the coextrusion process was presented. The modelling concerned chosen bilayer annular Newtonian flows (Fig. 4), at isothermal conditions, for various flow rate and viscosity values (Figs. 5—18). It has been stated that differences in viscosity of flow material result in displacement of polymer stream towards the more viscous phase and displacement of the maximum at velocity profile to the opposite direction. Instead the differences in flow rate result in transferring of the interface towards the phase of smaller flow rate. The known phenomenon of the stream swelling during Newtonian flow has been confirmed.

**Key words:** coextrusion, free surface problem, modelling, POLYFLOW system.

Kształtowanie powierzchni swobodnych ma bardzo duże znaczenie w przetwórstwie tworzyw, m.in. procesach wytłaczania, współwytłaczania, wytłaczania z rodmuchiowaniem bądź formowania próżniowego. Jedną z metod wspomagania projektowania tych procesów jest modelowanie komputerowe. Duże możliwości w tym zakresie ma system POLYFLOW [1].

System ten jest ogólnie zorientowanym pakietem programów MES (metody elementów skończonych) przeznaczonym do symulacji procesów, w których dominującą rolę odgrywają przepływy lepkie i lepkosprężyste. Mogą to być przepływy dwu- lub trójwymiarowe, ustalone lub nieustalone, izotermiczne lub nieizotermiczne.

Podstawy działania systemu oraz jego strukturę opisaliśmy w publikacjach [2, 3]. W pracy [4] rozważyliśmy jeden z podstawowych problemów kształtowania powierzchni swobodnych, mianowicie modelowanie zjawiska rozszerzania strugi tworzywa wypływającego z kanału formującego, np. kapilary reometru, głowicy wytłaczarki itp. Problem ten rozpatrzyliśmy w odniesieniu do izotermicznego przepływu uogólnionych cieczy newtonowskich. W pracy [5] podjęliśmy temat modelowania problemu odwrotnego do zagadnienia rozszerzania strugi. Polega on na poszukiwaniu charakterystyki geometrycznej kanału formującego w odniesieniu do zadanej charakterystyki geometrycznej powierzchni swo-

bodnej. Zagadnienie to rozważyliśmy również w odniesieniu do izotermicznego przepływu uogólnionych cieczy newtonowskich. W pracy [6] wykonaliśmy symulacje komputerowe wpływu warunków przepływu tworzywa (natężenia przepływu, kształtu i wymiarów kanału formującego oraz modelu reologicznego tworzywa) na zjawisko rozszerzania strugi. Symulacje te dotyczyły zarówno przepływów lepkich, jak i lepkosprężystych w warunkach izotermicznych.

W niniejszym artykule podejmujemy temat modelowania za pomocą systemu POLYFLOW problemu swobodnego kształtowania wielowarstwowego tworzywa, realizowanego w procesie współwytłaczania.

#### MODELOWANIE WSPÓŁWYTŁACZANIA

Analityczne modelowanie procesu współwytłaczania jest trudne i ogranicza się do opisu przepływu tworzywa w głowicy, np. [7]. Również rozwiązania numeryczne są zwykle ograniczone do tego obszaru, np. [8].

Program POLYFLOW umożliwia modelowanie procesu współwytłaczania zarówno w głowicy wytłaczarskiej, jak i w obszarze swobodnego kształtowania się strumienia tworzywa. Możliwe jest przy tym modelowanie przepływów lepkich oraz lepkosprężystych.

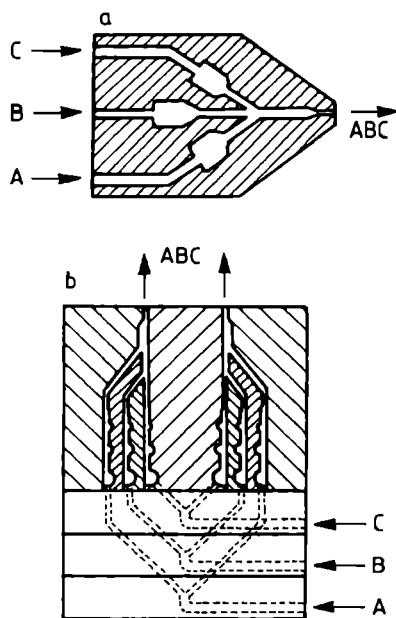
W tej pracy przedstawiamy problem modelowania przepływu newtonowskiego przez kanał pierścieniowy.

Podajemy przy tym dokładnie metodykę modelowania, która jest tu inna niż w poprzednich przypadkach [4—6]. W drugiej części pracy przedstawimy problem przepływów lepkosprężystych.

W kraju badań symulacyjnych dotychczas nie prowadzono. Przegląd innych prac w tym zakresie zawiera opracowanie [9]. Warto też zwrócić uwagę na publikacje [10] i [11].

### WYTŁACZANIE WIELOWARSTWOWE

Wytłaczanie wielowarstwowe, zwane często współwytłaczaniem, polega na równoczesnym wytłaczaniu przez głowicę dwóch lub większej liczby warstw tworzywa. Takie wytłaczanie realizuje się przy użyciu dwóch lub kilku wytłaczarek i jednej głowicy. W rezultacie uzyskuje się wyroby wielowarstwowe, np. folie lub rury, których poszczególne warstwy mogą się różnić właściwościami, strukturą albo kolorem. Mogą to być warstwy tego samego tworzywa bądź różnych tworzyw.



Rys. 1. Schematy kanałów przepływu w różnych typach głowic do wytłaczania wielowarstwowego: a) szczelinowej, b) rurowej; A, B, C — strugi tworzywa

Fig. 1. Schemes of flow channels in various coextrusion dies: a) slit, b) tubular; A, B, C — polymer streams

Przykłady schematów głowic do wytłaczania wielowarstwowego — szczelinowej (a) oraz rurowej (b) — przedstawia rys. 1.

### METODYKA MODELOWANIA

#### Modelowanie za pomocą systemu POLYFLOW (ogólna charakterystyka) [2—6]

System POLYFLOW składa się z kilku wzajemnie zależnych programów (modułów) służących do wprowadzania danych, wykonywania obliczeń i prezentowania

wyników. Ogólnie biorąc, modelowanie za pomocą systemu polega na zdefiniowaniu parametrów geometrycznych rozpatrywanego przepływu i założeniu siatki elementów skończonych (moduły POLYMESH\_2D i POLYMESH\_3D), następnie — na wprowadzeniu danych dotyczących właściwości tworzywa oraz warunków przepływu [brzegowych i początkowych (moduł POLYDATA)], wykonaniu obliczeń (moduł POLYFLOW) oraz przetworzeniu i zaprezentowaniu wyników (moduły POLYPLOT i 3D\_CROSS).

Podstawowym modułem modelowania w systemie POLYFLOW jest moduł POLYDATA, w którym opisuje się rozpatrywany problem. Modelowanie polega tutaj na ogólnym zdefiniowaniu tego problemu, a następnie na określeniu warunków brzegowych i początkowych dotyczących równania ruchu i równania energii. Zasady ogólnego definiowania problemu są takie same w różnych typach przepływu, natomiast reguły określania warunków brzegowych i początkowych zmieniają się w zależności od rozpatrywanego zagadnienia.

Ogólne definiowanie problemu polega na podaniu parametrów głównych zagadnienia, które określają:

- charakterystykę geometryczną przepływu (np. 2D osiowosymetryczny, 2D płaski, 2D 1/2 osiowosymetryczny, 2D 1/2 płaski, 3D);
- zależność parametrów przepływu od czasu (ustalony, nieustalony);
- zależność parametrów przepływu od temperatury (izotermiczny, nieizotermiczny);
- rodzaj równania konstytutywnego tworzywa (uogólnione newtonowskie, lepkosprężyste różniczkowe, lepkosprężyste całkowite).

Dalsze postępowanie w rozpatrywanym tutaj przypadku modelowania problemu swobodnego kształtowania wielowarstwowego polega na określeniu warunków brzegowych dotyczących równania ruchu.

#### Modelowanie swobodnego wytłaczania wielowarstwowego

Podstawą modelowania problemu kształtowania powierzchni swobodnych jest wyróżnienie w rozpatrywanym obszarze przepływu dwóch podobszarów: ustalonego i ruchomego. W obszarze ruchomym jedna z granic — powierzchnia swobodna — nie jest zdefiniowana i stanowi część rozwiązania zadania. Problem swobodnego kształtowania wielowarstwowego wnosi dodatkowy element modelowania, mianowicie ruchome granice rozdziału, oddzielające strumienie płynącego tworzywa. W przypadku przepływu dwuwarstwowego będzie to jedna granica, która jest nieznaną i stanowi część rozwiązania zadania.

Rozpatrywany problem — w odniesieniu do dwuwarstwowego przepływu pierścieniowego (osiowosymetrycznego) — jest ograniczony ośmioma granicami

i jego rozwiązanie wymaga określenia ośmiu różnych warunków brzegowych na tych granicach, tj. na:

- wlocie do kanałów przepływowych,
- wylocie z kanału,
- ściankach kanału,
- powierzchniach swobodnych,
- płaszczyźnie rozdziału.

W odniesieniu do równania ruchu są to (odpowiednio do tych granic) następujące warunki:

— *inflow* (wplyw) — opcja ta ustala istnienie w pełni rozwiniętego przepływu na danej granicy oraz zerowanie się składowej poprzecznej (w stosunku do kierunku przepływu) prędkości, a realizuje się ją podaniem objętościowego natężenia przepływu materiału;

— *outflow* (wypływ) — opcja ta oznacza zachowanie ciągłości warunków przepływu u wylotu z rozpatrywanego obszaru przepływu, a realizuje się ją również podaniem objętościowego natężenia przepływu materiału;

— *normal and tangential velocities imposed*, odpowiednio  $v_n$  i  $v_s$  (prędkości normalne i styczne) — opcja ta definiuje istnienie lub zanikanie na rozpatrywanej granicy przepływu (brzegu) składowych prędkości: normalnej i stycznej, np. stosowany tutaj warunek  $v_n = 0$  oraz  $v_s = 0$  oznacza, że granicę stanowi powierzchnia ścianki, na której nie występuje poślizg;

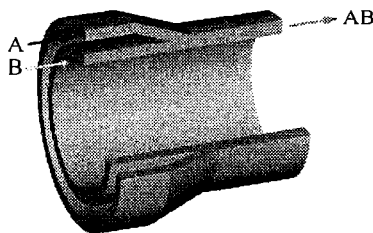
— *free surface* (powierzchnia swobodna) — opcja ta dopuszcza swobodne kształtowanie rozpatrywanej granicy;

— *interface* (powierzchnia rozdziału) — opcja ta ustala ciągłość warunków przepływu między dwoma obszarami analizy, rozdzielonymi powierzchnią graniczną (rozdziału), np. ciągłość pola prędkości.

## BADANIE WYBRANYCH PRZEPŁYWÓW WIELOWARSTWOWYCH

### Program badań

Program badań obejmował analizę dwuwarstwowych, pierścieniowych (rys. 2) przepływów newtonowskich.



Rys. 2. Schemat kanałów przepływu dwuwarstwowego, osiowo-symetrycznego; A, B — strugi

Fig. 2. Scheme of channels of axisymmetrical bilayer flow; A, B — polymer streams

### Model materiału

Badania wykonaliśmy w odniesieniu do różnych wartości lepkości (newtonowskiej) tworzywa. Jako wielkość podstawową przyjęliśmy  $\eta_0 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .

Rozpatrzyliśmy przypadki, w których lepkości badanych materiałów były jednakowe oraz przypadki, gdy były one różne:

$$\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \eta_2 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \eta_2 = 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_1 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\eta_1 = 5000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

gdzie:  $\eta_1$  — lepkość tworzywa w kanale wewnętrznym,  $\eta_2$  — lepkość w kanale zewnętrznym.

### Natężenie przepływu

Badania wykonaliśmy stosując różne wartości objętościowego natężenia przepływu. Jako wielkość podstawową przyjęliśmy natężenie przepływu równe:  $Q = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Rozważyliśmy przypadki, w których wartości natężenia przepływu były jednakowe w odniesieniu do obu materiałów oraz przypadki, kiedy były one różne:

$$Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_1 = 1150 \text{ l/s}) \quad Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_2 = 1000 \text{ l/s})$$

$$Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_1 = 1150 \text{ l/s}) \quad Q_2 = 4 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_2 = 2000 \text{ l/s})$$

$$Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_1 = 1150 \text{ l/s}) \quad Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_2 = 5000 \text{ l/s})$$

$$Q_1 = 4 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_1 = 2300 \text{ l/s}) \quad Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_2 = 1000 \text{ l/s})$$

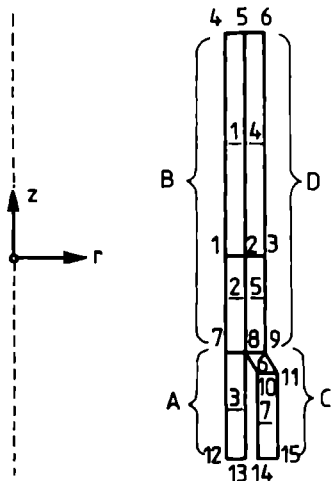
$$Q_1 = 10 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_1 = 5750 \text{ l/s}) \quad Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s} (\dot{\gamma}_2 = 1000 \text{ l/s})$$

gdzie:  $Q_1$  — natężenie przepływu w kanale wewnętrznym,  $Q_2$  — natężenie przepływu w kanale zewnętrznym; w nawiasach podajemy przybliżone wartości newtonowskiej szybkości ścinania na ściankach kanału wewnętrznego ( $\dot{\gamma}_1$ ) i zewnętrznego ( $\dot{\gamma}_2$ ).

### Sformułowanie problemu badań

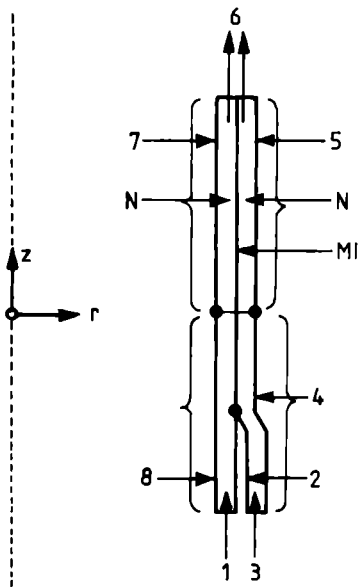
W podjętym problemie przepływu dwuwarstwowego rozważyliśmy przepływ dwóch materiałów, należało więc sformułować dwa oddzielne zadania składowe. W rozpatrywanym osiowo-symetrycznym przepływie newtonowskim będą to — z punktu widzenia mechaniki przepływu — takie same problemy, mianowicie: ustalone, 2D osiowo-symetryczne, izotermiczne przepływy newtonowskie.

Schemat geometryczny rozpatrywanego dwuwarstwowego przepływu osiowo-symetrycznego oraz podział obszaru przepływu na podobszary ustalone i ruchome przedstawia rys. 3. Wyróżniliśmy tutaj również odpowiednie makroelementy, czyli obszary, w których obowiązują jednolite reguły rozkładu elementów skończonych. Przyjęte warunki brzegowe pokazuje rys. 4, a rys. 5 obrazuje początkową (na początku obliczeń) siatkę elementów skończonych.



Rys. 3. Podobszary ustalone i ruchome przepływu (z wyróżnionymi makroelementami): A(3), C(6, Z) — podobszary ustalone; B(1, 2), D(4, 5) — podobszary ruchome; 1, 2, ..., 15 — makrowierzchołki

Fig. 3. Fixed and moving subdomains of flow (with macroelements marked): A(3), C(6, Z) — fixed subdomains; B(1, 2), D(4, 5) — moving subdomains; 1, 2, ..., 15 — macro-vertices



Rys. 4. Charakterystyka geometryczna i warunki brzegowe dwuwarstwowego przepływu osiowo-symetrycznego (w nawiasach makrowierzchołki wg rys. 3): 1(12-13), 3(14-15) — wlot; 2(13-8-10-14), 4(15-11-9-3), 8(1, 7, 12) — ścianka kanału; 5(3-6), 7(4-1) — powierzchnia swobodna; 6(6-5-4) — wylot; MI — powierzchnia rozdziálu, N — ciecz newtonowska

Fig. 4. Geometrical characteristic and boundary conditions of axisymmetrical bilayer flow (in brackets — macro-vertices as in Fig. 3): 1(12-13), 3(14-15) — inflow; 2(13-8-10-14), 4(15-11-9-3), 8(1, 7, 12) — channel wall, 5(3-6), 7(4-1) — free surface; 6(6-5-4) — outflow; MI — interface, N — Newtonian liquid

Rys. 5. Początkowa siatka elementów skończonych



Rys. 5. Początkowa siatka elementów skończonych

Fig. 5. Initial mesh of finite elements

Rys. 6. Siatka (zdeformowana) elementów skończonych, będąca wynikiem obliczeń: ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )



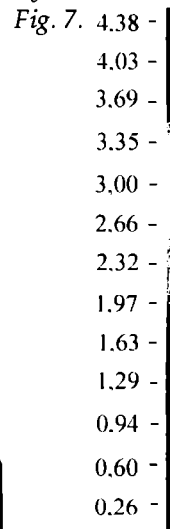
Rys. 6. Siatka (zdeformowana) elementów skończonych, będąca wynikiem obliczeń: ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Fig. 6. Deformed mesh of finite elements, being a result of calculations ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Wyniki symulacji

Rysunki 6—10 przedstawiają przykłady wyników dotyczących podstawowych warunków symulacji, tzn.

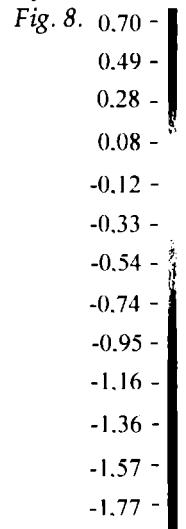
Rys. 7.



Rys. 7. Rozkład składowej osiowej prędkości przepływu UV2 ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

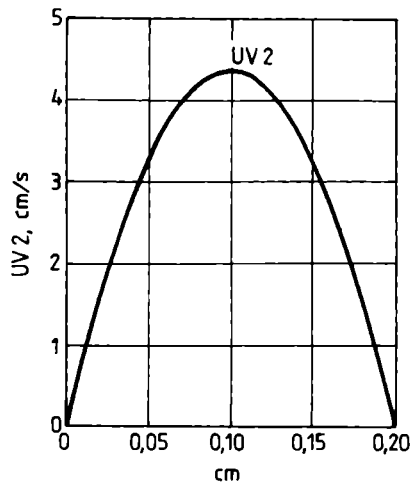
Fig. 7. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Rys. 8.

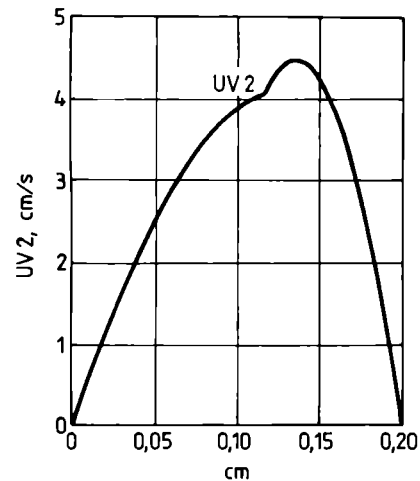


Rys. 8. Rozkład składowej promieniowej prędkości UV1 przepływu ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

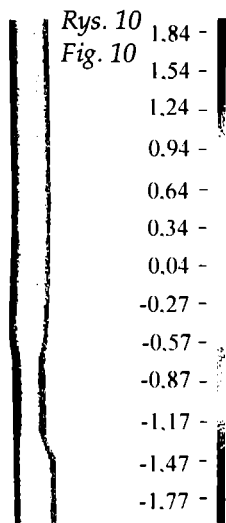
Fig. 8. Distribution of radial component of the flow velocity UV1 ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )



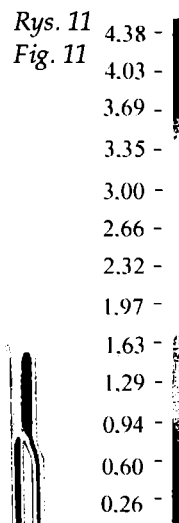
Rys. 9. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu u wylotu głowicy ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )  
 Fig. 9. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 at the die exit ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )



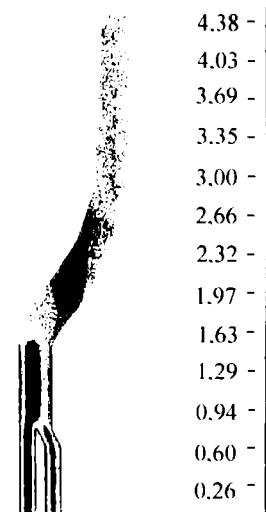
Rys. 12. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu u wylotu głowicy w przypadku zwiększenia lepkości w kanale wewnętrznym ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )  
 Fig. 12. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 at the die exit for an increased viscosity within the inner channel case ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )



Rys. 10. Rozkład linii prądu przepływu ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )  
 Fig. 10. Distribution of flow stream lines ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )



Rys. 11. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu w przypadku zwiększenia lepkości w kanale wewnętrznym ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )  
 Fig. 11. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 for an increased viscosity within the inner channel case ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

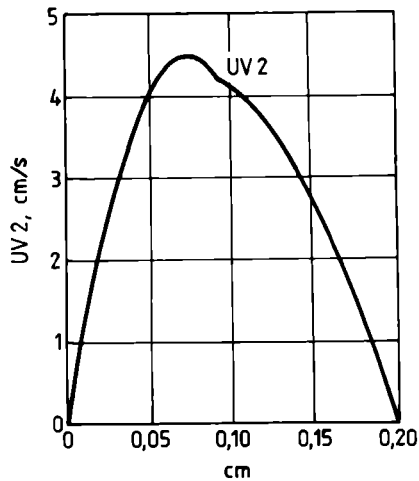


Rys. 13. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu w przypadku zwiększenia lepkości w kanale zewnętrznym ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )  
 Fig. 13. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 for an increased viscosity within the outer channel case ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

$Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . Wyniki te obejmują zdeformowaną siatkę elementów skończonych, która stanowi element rozwiązania zadania, a także rozkłady składowej osiowej i promieniowej prędkości oraz rozkład linii prądu przepływu.

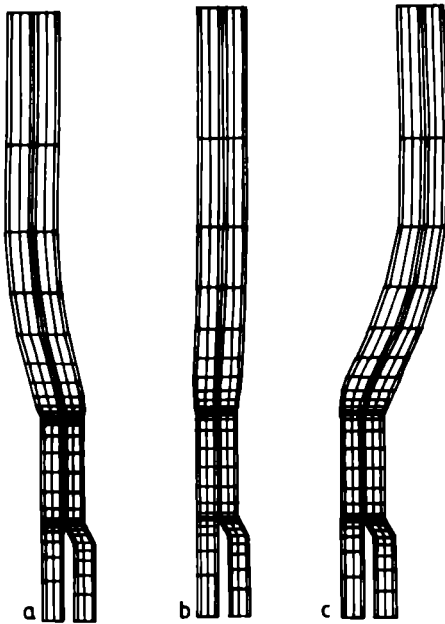
Rysunki 11 i 12 obrazują rozkłady prędkości przepływu odnoszące się do symulacji, w której została zwiększona lepkość tworzywa w kanale wewnętrznym ( $\eta_1 =$

$5000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), a rysunki 13 i 14 — wyniki odnoszące się do obliczeń, w których została zwiększona lepkość w kanale zewnętrznym ( $\eta_2 = 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ). Zwiększenie lepkości w jednym kanale powoduje przesunięcie maksimum profilu prędkości w kierunku kanału drugiego oraz odchylenie strumienia w kierunku przeciwnym. Warstwa tworzywa o mniejszej lepkości działa tutaj jak warstwa smarująca.



Rys. 14. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu u wylotu głowicy w przypadku zwiększenia lepkości w kanale zewnętrznym ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

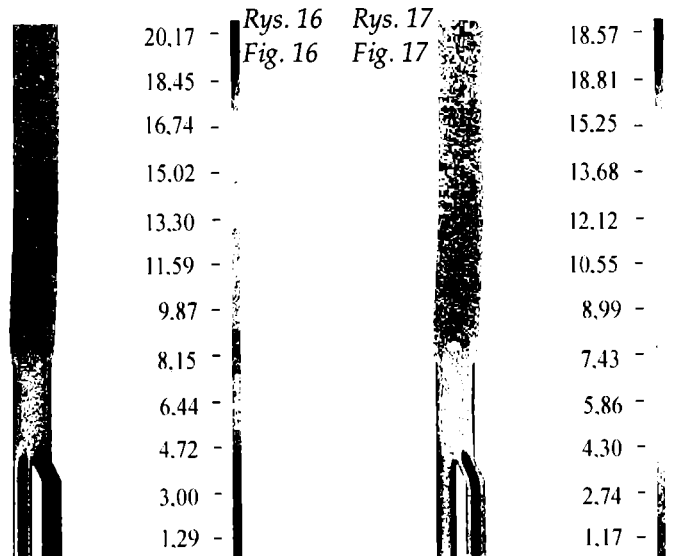
Fig. 14. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 at the die exit for an increased viscosity within the outer channel case ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 3000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )



Rys. 15. Wynikowe siatki elementów skończonych: a) lepkość większa w kanale wewnętrznym ( $\eta_1 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), b) lepkość jednakowa w obydwu kanałach ( $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), c) lepkość większa w kanale zewnętrznym ( $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Fig. 15. Final meshes of finite elements: a) viscosity is higher within the inner channel ( $\eta_1 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), b) viscosity is equal within both channels ( $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), c) viscosity is higher within the outer channel ( $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Rysunek 15 ilustruje wynikowe siatki elementów skończonych, odpowiadające trzem przypadkom symu-



Rys. 16. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu w przypadku zwiększenia natężenia przepływu w kanale wewnętrznym ( $Q_1 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Fig. 16. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 for an increased viscosity within the inner channel case ( $Q_1 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

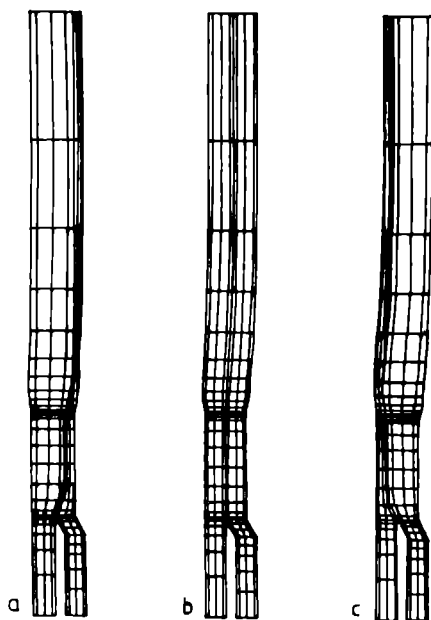
Rys. 17. Rozkład składowej osiowej prędkości UV2 przepływu w przypadku zwiększonego natężenia w kanale zewnętrznym ( $Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

Fig. 17. Distribution of axial component of the flow velocity UV2 for an increased viscosity within the outer channel case ( $Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

lacji, w których lepkość jest większa w kanale wewnętrznym ( $\eta_1 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ) bądź jest jednakowa w obydwu kanałach ( $\eta_1 = \eta_2 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), bądź też jest większa w kanale zewnętrznym ( $\eta_1 = 1000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\eta_2 = 2000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ).

Rysunek 16 przedstawia rozkład prędkości odnoszący się do symulacji, w której zostało zwiększone natężenie przepływu w kanale wewnętrznym ( $Q_1 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a rysunek 17 — rozkład prędkości wynikający z obliczeń, w których zostało zwiększone natężenie w kanale zewnętrznym ( $Q_2 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Rysunek 18 ilustruje wynikowe siatki elementów skończonych odpowiadające trzem przypadkom symulacji, w których natężenie przepływu jest większe w kanale wewnętrznym ( $Q_1 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) bądź jest jednakowe w obydwu kanałach ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ), bądź też jest większe w kanale zewnętrznym ( $Q_2 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Można więc zaobserwować, że zwiększenie natężenia przepływu w jednym z kanałów powoduje przesunięcie powierzchni rozdziału w kierunku drugiego kanału.

Z omówionych tu symulacji wynika też, że w modelu newtonowskim występuje zjawisko rozszerzania strumienia. Jest to rezultat zgodny z innymi rezultatami badań teoretycznych oraz z obserwacjami doświadczalnymi [10]. Zagadnienie to opisaliśmy w pracy [4].



Rys. 18. Wynikowe siatki elementów skończonych: a) natężenie przepływu większe w kanale wewnętrznym ( $Q_1 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), b) natężenie przepływu jednakowe w obydwu kanałach ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), c) natężenie przepływu większe w kanale zewnętrznym ( $Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ )

Fig. 18. Final meshes of finite elements: a) flow rate is higher within the inner channel ( $Q_1 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), b) flow rate is equal within both channels ( $Q_1 = Q_2 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), c) flow rate is higher within the outer channel ( $Q_1 = 2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{s}$ )

#### PODSUMOWANIE

Przedstawiliśmy metodykę modelowania za pomocą systemu POLYFLOW problemu swobodnego kształtowania wielowarstwowego, występującego w procesie współwytłaczania. Modelowanie dotyczyło wybranych dwuwarstwowych, pierścieniowych przepływów newtonowskich, w warunkach izotermicznych. Program badań obejmował przepływ przez głowicę w odniesieniu do różnych wartości natężenia przepływu materiału i jego lepkości.

Stwierdziliśmy, że różnice lepkości płynących materiałów powodują odchylenie strugi tworzywa w stronę

materiału bardziej lepkiego oraz przesunięcie maksimum profilu prędkości w kierunku przeciwnym, natomiast różnice natężenia przepływu wywołują przesunięcie powierzchni rozdziału w kierunku warstwy o mniejszym natężeniu tego przepływu. Potwierdziliśmy też znane obserwacje występowania zjawiska rozszerzania strugi w przepływie newtonowskim [12].

Przedstawiona metodyka modelowania może znaleźć zastosowanie do analizy przepływów w kanałach o różnej charakterystyce geometrycznej, może więc stanowić użyteczne narzędzie projektowania, np. głowic wytłaczarskich. Badania należy jednak prowadzić w odniesieniu do uogólnionych cieczy newtonowskich lub — jeszcze lepiej — z wykorzystaniem modeli lepkosprężystych. W drugiej części pracy przedstawimy wyniki takich badań.

#### LITERATURA

1. Crochet M. J. i in.: User's Manual — POLYFLOW, Polyflow s.a., Louvain-la-Neuve 1993, Belgia.
2. Wilczyński K., Tyszkiewicz A.: *Polimery* 1996, **41**, 107.
3. Wilczyński K., Łaczyński B., Czaplarska A.: *Polimery* 1998, **43**, 115.
4. Wilczyński K., Łaczyński B., Szymaniak Z.: *Polimery* 1999, **44**, 683.
5. Wilczyński K., Szymaniak Z., Nastaj A.: *Polimery* 2000, **45**, 631.
6. Wilczyński K., Szymaniak Z., Nastaj A.: *Polimery* 2002, **47**, 130.
7. Han C. D.: „Rheology in Polymer Processing”, Academic Press, Nowy Jork 1976.
8. Michaeli W.: „Extrusion Dies for Plastics and Rubber”, Hanser, Nowy Jork 1992.
9. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw sztucznych”, Wyd. Edukacyjne Żak, Warszawa 1993.
10. Anufrev V. A., Stasiek J.: *Polimery* 1996, **41**, 167.
11. Stasiek J.: *Progr. Rubber Plast. Technol.* 2000, **16**, 183.
12. Vlachopoulos J.: „Polymer Rheology and Extrusion”, Mc Master University, Toronto 1998.

Otrzymano 17 V 2001 r.  
Wersja skorygowana 27 VIII 2002 r.