

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI,  
ZBIGNIEW SZYMANIAK, ANDRZEJ NASTAJ

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

## Modelowanie problemu odwrotnego do problemu rozszerzania strugi polimerów za pomocą systemu POLYFLOW

### MODELING OF THE INVERSE EXTRUDATE SWELL PROBLEM BY THE USE OF THE POLYFLOW SYSTEM

**Summary** — The inverse extrudate swell problem (Fig. 1) was modeled in generalized Newtonian fluids, *i.e.*, fluids whose viscosity is a function of shear rate and temperature. Two selected three-dimensional types of flow, one geometrically simple (rectangular) (Figs. 2–5) and the other relatively complicated (Figs. 10–12), were modeled by using the POLYFLOW System. The modeling method was found to be useful to analyze the flow of generalized Newtonian fluids in channels of varying geometries and to design tools like extrusion dies.

**Key words:** inverse extrudate swell problem, flow of generalized Newtonian fluids, modeling with the POLYFLOW System.

Jednym z głównych kierunków rozwoju przetwórstwa tworzyw sztucznych jest komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa, które stanowi efektywne i ekonomiczne narzędzie projektowania oraz badań.

Systemy komputerowego modelowania procesów przetwórstwa tworzyw można podzielić na systemy ogólnie zorientowane (tzn. o przeznaczeniu ogólnym) oraz systemy zorientowane na określoną technikę przetwórstwa (np. wytłaczanie lub wtryskiwanie). Ogólnie biorąc, działanie tych systemów polega na rozwiązywaniu równań zachowania masy, ruchu i energii w odniesieniu do różnych modeli materiału w określonych warunkach brzegowych i początkowych. Krótką charakterystykę systemów komputerowego modelowania procesów przetwórstwa tworzyw przedstawiliśmy w [1].

W Zakładzie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Instytutu Technologii Materiałowych Politechniki Warszawskiej uruchomiono w 1995 r. system komputerowego modelowania procesów przetwórstwa materiałów nienewtonowskich (m.in. tworzyw sztucznych) — POLYFLOW [1, 2]. 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 albo nieustalone, izotermiczne bądź nieizotermiczne. System oferuje bardzo szeroki wachlarz modeli (tzn. równań konstytutywnych) materiału, które można dobierać odpowiednio do rozpatrywanego problemu. Modele te tworzą trzy podstawowe grupy:

- uogólnionych modeli newtonowskich,
- różniczkowych modeli lepkosprężystych,
- całkowych modeli lepkosprężystych.

Podstawy działania systemu oraz jego strukturę opisaliśmy w [1, 2], a w pracy [3] rozważyliśmy problem modelowania zjawiska swobodnego kształtowania (rozszerzania) strugi tworzywa wpływającego z kanału formującego, np. kapilary reometru, głowicy wytłaczarki itp. (ang. *extrudate swell problem*). Natomiast w pracy stanowiącej przedmiot niniejszego artykułu podjęliśmy próbę modelowania problemu odwrotnego do zagadnienia rozszerzania strugi. Zadanie to polega na poszukiwaniu charakterystyki geometrycznej kanału formującego w odniesieniu do zadanej charakterystyki geometrycznej powierzchni swobodnej. Problem ten rozważyliśmy w przypadku przepływu uogólnionych cieczy newtonowskich, tj. cieczy lepkich, których lepkość jest funkcją prędkości ścinania i temperatury. Przepływy tej klasy stanowią podstawowy i bardzo rozległy zbiór problemów modelowych, zwykle nieliniowych.

## ZJAWISKO ROZSZERZANIA STRUGI TWORZYWA I PROBLEM ODWROTNY

Kształtowanie powierzchni swobodnych stanowi obszerną grupę zagadnień praktycznych i teoretycznych w przetwórstwie tworzyw. Do podstawowych zalicza się tutaj wspomniany już, przedstawiony przez nas w pracy [3] problem kształtowania strugi tworzywa wypływającego z kanału formującego, np. głowicy wytłaczarskiej, polegający na poszukiwaniu charakterystyki geometrycznej powierzchni swobodnej w odniesieniu do zadanej charakterystyki geometrycznej kanału.

Zjawisko rozszerzania strugi tworzywa wypływającego z kanału formującego (zwane niekiedy efektem Barusa) ma bardzo duże znaczenie w przetwórstwie tworzyw<sup>\*)</sup>. Stopień występowania tego zjawiska jest zwykle definiowany stosunkiem określonego wymiaru strugi do odpowiadającego mu wymiaru kanału. W przypadku polimerów stopień taki jest bardzo duży i zwykle mieści się w przedziale 1,5–2,5, chociaż niekiedy może osiągnąć większe wartości.

Mechanizm powstawania zjawiska rozszerzania strugi polimerów jest bardzo złożony [3]. Można wyróżnić cztery podstawowe składniki tego mechanizmu: rozszerzanie newtonowskie, natychmiastowe powrotne odkształcenie sprężyste, odkształcenie niesprężyste wynikające z warunków termicznych oraz odkształcenie wynikające z relaksacji naprężeń. Tak więc można zapisać, że:

$$B_x = B_{newt} + B_{spr} + B_{nspr} + B_{rel} \quad (1)$$

gdzie:  $B_x$  — stopień rozszerzania strugi w stanie równowagi (tj. w czasie nieskończonym),  $B_{newt}$  — składowa newtonowska odkształcenia,  $B_{spr}$  — składowa sprężysta,  $B_{nspr}$  — składowa niesprężysta (termiczna),  $B_{rel}$  — składowa relaksacji naprężeń.

Skutkiem istnienia zjawiska rozszerzania strugi jest powstanie zdefiniowanego we wstępnej części niniejszego artykułu problemu odwrotnego (ang. "inverse extrudate swell problem"). Jest to klasyczny problem pojawiający się podczas projektowania narzędzi do przetwórstwa tworzyw, np. głowic wytłaczarskich, kiedy to konstruktor poszukuje kształtu i wymiarów narzędzia, które zapewnią mu uzyskanie żądanego kształtu i wymiarów wyrobu.

### METODYKA MODELOWANIA PROBLEMU ODWROTNEGO DO ZJAWISKA ROZSZERZANIA STRUGI

System POLYFLOW składa się z kilku wzajemnie zależnych programów (modułów) służących do wprowadzania danych, wykonywania obliczeń i prezentowania wyników. Ogólnie biorąc, modelowanie za pomocą tego systemu polega na zdefiniowaniu charakterystyki geometrycznej rozpatrywanego przepływu i

założeniu siatki elementów skończonych (moduły POLYMESH-2D i POLYMESH-3D), na następnym wprowadzeniu danych dotyczących właściwości materiału oraz warunków przepływu — brzegowych i początkowych (moduł POLYDATA), wykonaniu obliczeń (moduł POLYFLOW) oraz przetworzeniu i zaprezentowaniu wyników (moduły POLYPLOT i 3D-CROSS). Strukturę systemu POLYFLOW oraz schematy działania poszczególnych modułów przedstawiliśmy w [1].

Powtórzmy za [3], że podstawowym modułem modelowania w systemie POLYFLOW jest moduł POLYDATA, w którym opisujemy rozpatrywany problem. Modelowanie polega tutaj na ogólnym zdefiniowaniu tego problemu i następnie na określeniu warunków brzegowych oraz początkowych dotyczących równania ruchu i równania energii.

Ogólne definiowanie problemu to określenie parametrów głównych zadania, które definiują:

- postać geometryczną problemu (np. 2D osiowosymetryczny, 2D płaski, 2D1/2 osiowosymetryczny, 2D1/2 płaski, 3D),
- zależność od czasu (ustalony, nieustalony),
- zależność od temperatury (izotermiczny, nieizotermiczny),
- typ równania konstytutywnego materiału (uogólnione newtonowskie, lepkosprężyste różniczkowe, lepkosprężyste całkowite).

Dalsze postępowanie w rozpatrywanym tutaj przypadku modelowania problemu odwrotnego polega na określeniu warunków brzegowych dotyczących równania ruchu. Postępowanie to opisaliśmy poniżej na przykładzie przepływu trójwymiarowego przez kanał o przekroju prostokątnym. Rozwiązaniem tego przykładu będzie kształt kanału niezbędny do uzyskania strugi tworzywa o przekroju prostokątnym i o określonych wymiarach.

Podstawą modelowania problemu odwrotnego jest wyróżnienie w rozpatrywanym obszarze przepływu czterech podobszarów:

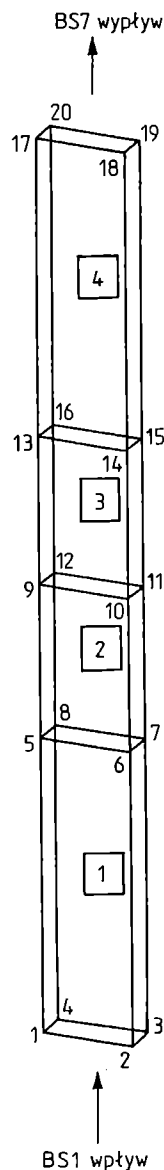
- ustalonego (ang. *fixed*),
- dostosowującego (ang. *adaptive*),
- stałego (ang. *constant*),
- swobodnego (ang. *free jet*).

Pierwsze trzy podobszary występują w kanale, natomiast czwarty obejmuje swobodną strugę tworzywa. Za początkowy, całkowity obszar przepływu (obejmujący cztery powyższe podobszary) przyjmuje się prostopadłościan o wymiarach przekroju poprzecznego odpowiadających zadanym wymiarom strugi (rys. 1). Wartości długości poszczególnych podobszarów ustala się *a priori*, na podstawie zadanych wymiarów narzędzia oraz doświadczenia uzyskanego podczas tego typu modelowania.

Rozpatrywany problem jest ograniczony siedmioma granicami (BS1—BS7) i jego rozwiązanie wymaga określenia warunków brzegowych na tych granicach, tj. w następujących miejscach:

\*) Por. R. Sikora, *Polimery* 1997, 42, 50 (przypis redakcji).

- wlot do kanału (BS1),
- wylot z kanału (BS7),
- ściana kanału (BS4),



Rys. 1. Warunki brzegowe problemu odwrotnego do problemu rozszerzania strugi na przykładzie trójwymiarowego przepływu przez kanał prostokątny: 1 — podobszar ustalony, 2 — podobszar dostosowujący, 3 — podobszar stały, 4 — podobszar swobodny; BS1 — wplyw, BS2 i BS3 — płaszczyzny symetrii (płaszczyzny 1, 2, 18, 17 i 1, 4, 20, 17), BS4 — ściany kanału (płaszczyzny 2, 3, 15, 14 i 4, 3, 15, 16), BS5 i BS6 — powierzchnie swobodne (płaszczyzny 14, 15, 19, 18 i 16, 15, 19, 20), BS7 — wypływ

Fig. 1. Boundary conditions for the inverse extrudate swell 3-D problem in a rectangular channel: 1 — fixed subdomain, 2 — adaptive subdomain, 3 — constant subdomain, 4 — free jet, BS1 — inflow, BS2 and BS3 — symmetry planes (planes 1, 2, 18, 17 and 1, 4, 20, 17), BS4 — channel walls (planes 2, 3, 15, 14 and 4, 3, 15, 16), BS5 and BS6 — free surface (planes 14, 15, 19, 18 and 16, 15, 19, 20), BS7 — outflow

- powierzchnie swobodne (2 granice: BS5, BS6),
- płaszczyzny symetrii (2 granice: BS2, BS3) lub osie symetrii w przypadku przepływu osiowosymetrycznego.

Warunki brzegowe zostały już zdefiniowane w pracy [3], lecz ze względu na całkowitość opisu w niniejszym opracowaniu zostaną one poniżej przedstawione ponownie:

1) *Inflow* (wplyw) — opcja ta ustala istnienie w pełni rozwiniętego przepływu na rozpatrywanej granicy oraz zerowanie się składowej stycznej (w stosunku do kierunku przepływu) prędkości; jest ona realizowana przez podanie objętościowego natężenia przepływu materiału.

2) *Outflow* (wypływ) — opcja ta oznacza zachowanie ciągłości warunków przepływu u wylotu z rozpatrywanego obszaru przepływu; ustala ona zanikanie składowej normalnej gęstości siły oraz składowej stycznej (w stosunku do kierunku przepływu) prędkości i odpowiada warunkowi  $f_n = 0$ ,  $v_s = 0$ , gdzie  $f_n$  — składowa normalna gęstości siły,  $v_s$  — składowa styczna prędkości.

3) *Normal and tangential velocities imposed* ( $v_n$  i  $v_s$ ) (składowe prędkości: normalna  $v_n$  i styczna  $v_s$ ) — opcja ta definiuje istnienie lub zanikanie na rozpatrywanej granicy przepływu (brzegu) składowych prędkości; np. warunek  $v_n = 0$ ,  $v_s = 0$  oznacza, że granicę stanowi ściana, na której nie występuje poślizg.

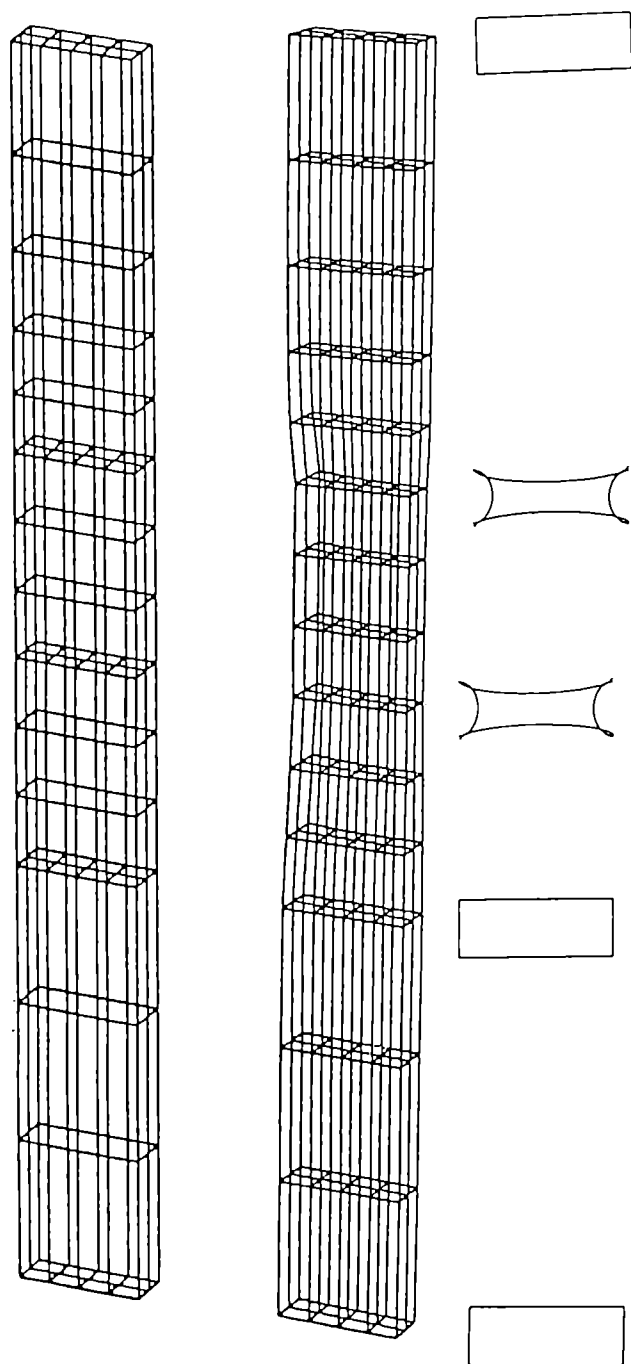
4) *Free surface* (powierzchnia swobodna) — opcja ta dopuszcza swobodne kształtowanie rozpatrywanej granicy.

5a) *Plane of symmetry* (płaszczyzna symetrii) — opcja ta ustala symetrię warunków przepływu względem płaszczyzny symetrii.

5b) *Axis of symmetry* (oś symetrii) — opcja ta ustala symetrię warunków przepływu względem osi symetrii (w przypadku przepływu osiowosymetrycznego).

W trakcie obliczeń nie ulega zmianie jedynie charakterystyka geometryczna podobszaru ustalonego, natomiast charakterystyka geometryczna trzech pozostałych podobszarów zmienia się i stanowi część rozwiązania zadania. Rysunek 2 pokazuje początkową konfigurację siatki elementów skończonych a rys. 3 — konfigurację końcową (zdeformowaną), uzyskaną po zakończeniu obliczeń i stanowiącą rozwiązanie zadania. Główny element rozwiązania stanowi podobszar stały; jest to mianowicie ustnik głowicy, ustalający ostateczny kształt wytłaczanego strumienia tworzywa. Podobszar dostosowujący to łącznik między podobszarem ustalonym a stałym, odpowiednio dostosowujący ich siatki elementów skończonych. Wreszcie, podobszar swobodny zmienia swoją charakterystykę geometryczną w taki sposób, że na początku odpowiada ona charakterystyce geometrycznej podobszaru stałego, a na końcu jest równa zadanej charakterystyce geometrycznej strugi tworzywa (wyrobu).

Występowanie w rozpatrywanym problemie niezdefiniowanej powierzchni swobodnej wymaga wprowa-



Rys. 2

Rys. 3

Rys. 2. Pierwotna siatka elementów skończonych

Fig. 2. The initial mesh of finite elements

Rys. 3. Zdeformowana siatka elementów skończonych —  
wynik obliczeń

Fig. 3. The final mesh of finite elements — results of calculations

dzenia dwóch dodatkowych warunków. Pierwszy z nich definiuje geometryczne stopnie swobody na odpowiednich granicach przepływu — przez podanie ograniczeń swobodnego kształtowania w fizycznie dopuszczalnych kierunkach odkształcania. Jest on realizowany za pomocą opcji *kinematic conditions* (warunki kinema-

tyczne). Warunek drugi dotyczy rekonstrukcji siatki elementów skończonych w podobszarach ruchomych, co wynika z faktu, że kształt tych podobszarów zmienia się w trakcie rozwiązywania zadania. Rekonstrukcję tę przeprowadza się za pomocą opcji *remeshing* (rekonstrukcja siatki).

Poniżej przedstawiliśmy przykłady modelowania problemu odwrotnego w przypadku przepływu trójwymiarowego przez kanał o przekroju prostokątnym oraz przez kanał o złożonej charakterystyce geometrycznej.

#### BADANIE PROBLEMU ODWROTNEGO W ODNIESIENIU DO WYBRANYCH UOGÓLNIONYCH PRZEPŁYWÓW NEWTONOWSKICH

##### Przepływ trójwymiarowy przez kanał prostokątny

Charakterystykę geometryczną rozpatrywanego przepływu oraz przyjęte warunki brzegowe przedstawiliśmy na rys. 1. Badany problem zdefiniowaliśmy ogólnie jako ustalony, 3D, izotermiczny, uogólniony przepływ newtonowski.

Przyjęliśmy model cieczy Bird-Carreau:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2} \quad (2)$$

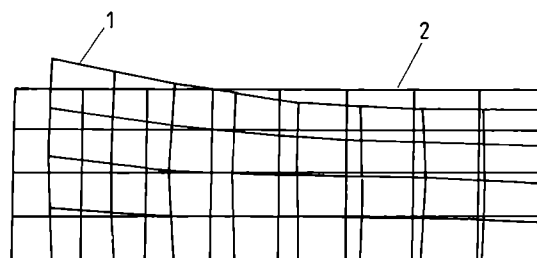
gdzie:  $\eta$  — lepkość,  $\eta_0$  — stała lepkościowa,  $\lambda$  — stała czasowa,  $\dot{\gamma}$  — szybkość ścinania,  $n$  — wykładnik płynięcia.

Założyliśmy następujące wartości parametrów tego modelu:

- stała lepkościowa,  $\eta_0 = 5,0 \cdot 10^3$  poise ( $5,0 \cdot 10^2$  Pa · s),
- stała czasowa,  $\lambda = 0,1$  s,
- wykładnik płynięcia,  $n = 0,6$ .

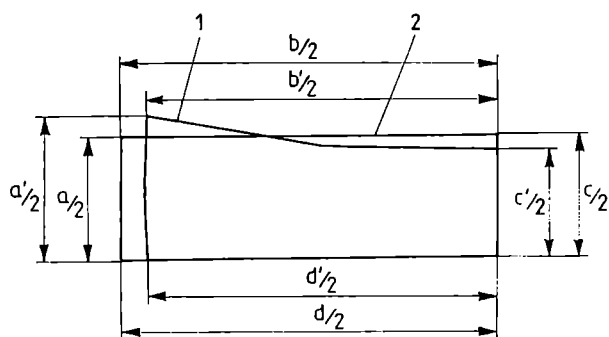
Ponadto założyliśmy, że natężenie przepływu  $Q = 300$  cm<sup>3</sup>/s.

Pierwotną siatkę elementów skończonych rozpatrywanego problemu (tj. siatkę wstępną służącą do wykonania obliczeń) przedstawiliśmy na rys. 2, natomiast na



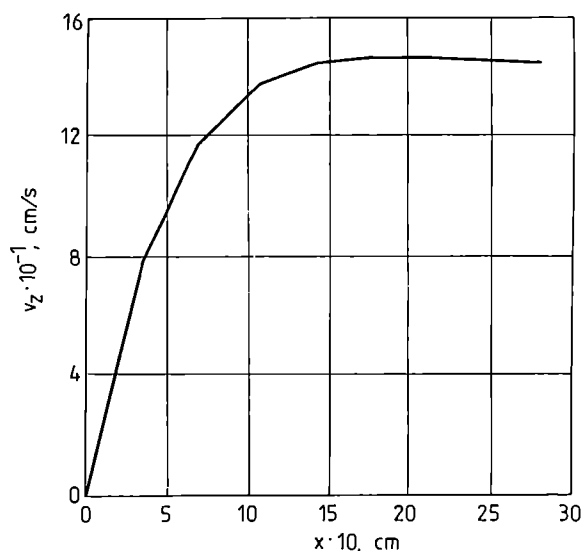
Rys. 4. Przekrój poprzeczny siatki elementów skończonych w ustniku formującym strugę (podobszar stały) (1) na tle końcowego przekroju poprzecznego siatki, tj. zadanego przekroju poprzecznego strugi tworzącej (2)

Fig. 4. A cross-section of the finite element mesh in the die lip section (constant subdomain) (1) compared with outlet section (2), i.e., the looked-for cross-section of the extrudate swell



Rys. 5. Charakterystyka geometryczna przekroju poprzecznego ustnika formującego (podobszar stały) (1) na tle charakterystyki geometrycznej zadanego przekroju poprzecznego strugi tworzywa (2):  $a, b, c, d$  — wymiary projektowanego wyrobu;  $a', b', c', d'$  — wymiary ustnika formującego;  $a' = 1,158a, b' = 0,933b, c' = 0,875c, d' = 0,927d$

Fig. 5. The geometrical characteristics of the die lip section (constant subdomain) (1) compared with assumed geometrical characteristics of the outlet cross-section (2):  $a, b, c, d$  — product dimensions;  $a', b', c', d'$  — die lip section dimensions (1.158a, 0.933b, 0.875c, 0.9275d, respectively)



Rys. 6. Składowa  $v_z$  prędkości w kierunku długości kanału  $z$  — w ustniku formującym (w płaszczyźnie  $xz$ , w połowie wysokości rozpatrywanej części kanału)

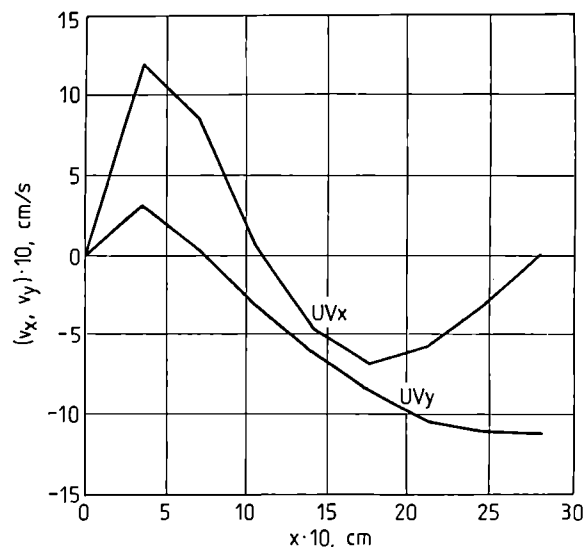
Fig. 6. Velocity component  $v_z$  in direction  $z$  (long channel axis) in the die lip section (in plane  $xz$  at half-height of considered channel segment)

rys. 3 pokazaliśmy siatkę zdeformowaną, która jest wynikiem wykonanych obliczeń. Rysunki 4 i 5 przedstawiają przekrój poprzeczny ustnika formującego (podobszar stały) na tle końcowego (tj. zadanego) przekroju poprzecznego strugi tworzywa.

Wyniki obliczeń (rys. 5) wskazują, że w celu uzyskania zadanej charakterystyki geometrycznej strugi (o

prostokątnym przekroju poprzecznym) należy zaprojektować ustnik o charakterystyce geometrycznej zasadniczo różnej i o bardzo odmiennych wymiarach. Różnice wymiarów sięgają tutaj kilkunastu procent.

Pozostałe, przykładowe wyniki obliczeń przedstawiliśmy na rys. 6—9. Dotyczą one rozkładu prędkości i ciśnienia.



Rys. 7. Składowe  $v_x$  i  $v_y$  prędkości w kierunku szerokości kanału  $x$  oraz wysokości kanału  $y$  — w ustniku formującym (w płaszczyźnie  $xz$ , w połowie wysokości rozpatrywanej części kanału)

Fig. 7. Velocity components  $v_x$  and  $v_y$  in direction  $x$  (short channel axis) and direction  $y$  (channel height) in the die lip section

### Przepływ trójwymiarowy przez kanał o złożonej charakterystyce geometrycznej

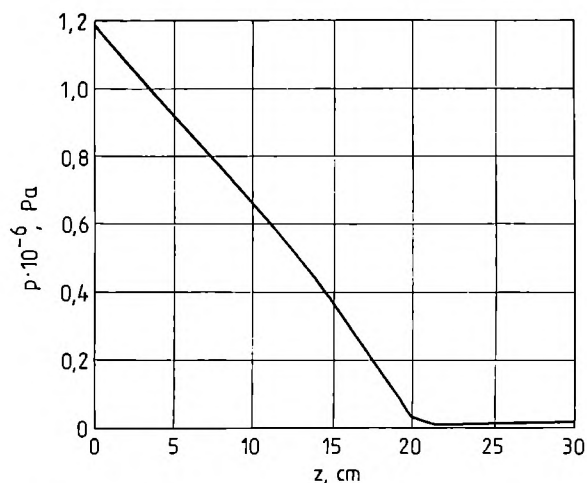
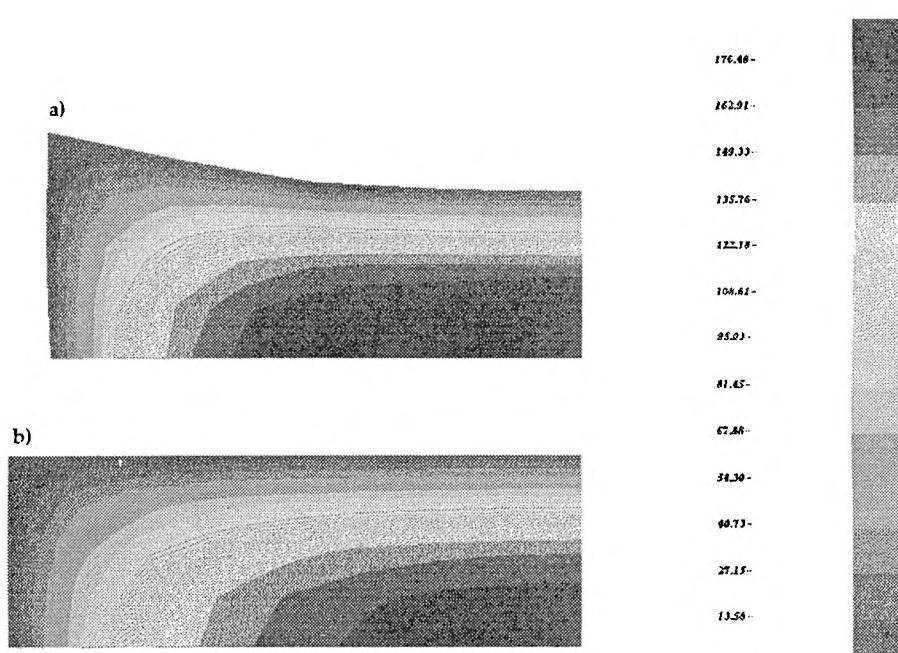
Charakterystykę geometryczną rozpatrywanego przepływu oraz przyjęte warunki brzegowe przedstawiliśmy na rys. 10. Badany problem zdefiniowaliśmy ogólnie jako: ustalony, 3D, izotermiczny, uogólniony przepływ newtonowski (o stałej lepkości). Założyliśmy w tym przykładzie, że lepkość  $\eta = 100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , a objętościowe natężenie przepływu  $Q = 70 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Rozpatrywany problem jest ograniczony 11 granicami zdefiniowanymi na rys. 10 i jego rozwiązanie wymaga określenia warunków brzegowych na tych granicach.

Pierwotną globalną siatkę elementów skończonych rozpatrywanego problemu pokazaliśmy na rys. 11, a rys. 12 przedstawia charakterystykę geometryczną (przekrój poprzeczny siatki elementów skończonych) ustnika formującego (podobszar stały) na tle zadanej charakterystyki geometrycznej (siatki elementów skończonych przekroju poprzecznego) strugi tworzywa. Rysunki 13 i 14 ilustrują przykładowe wyniki obliczeń dotyczące, odpowiednio, rozkładu prędkości i ciśnienia.

Rys. 8. Rozkład prędkości  $v_z$  (w cm/s) w przekroju poprzecznym ustnika (a) i w końcowej części swobodnie kształtującej się strugi (b)

Fig. 8. Velocities  $v_z$  (cm/s) in (a) die lip cross-section and (b) outlet section of the extrudate swell

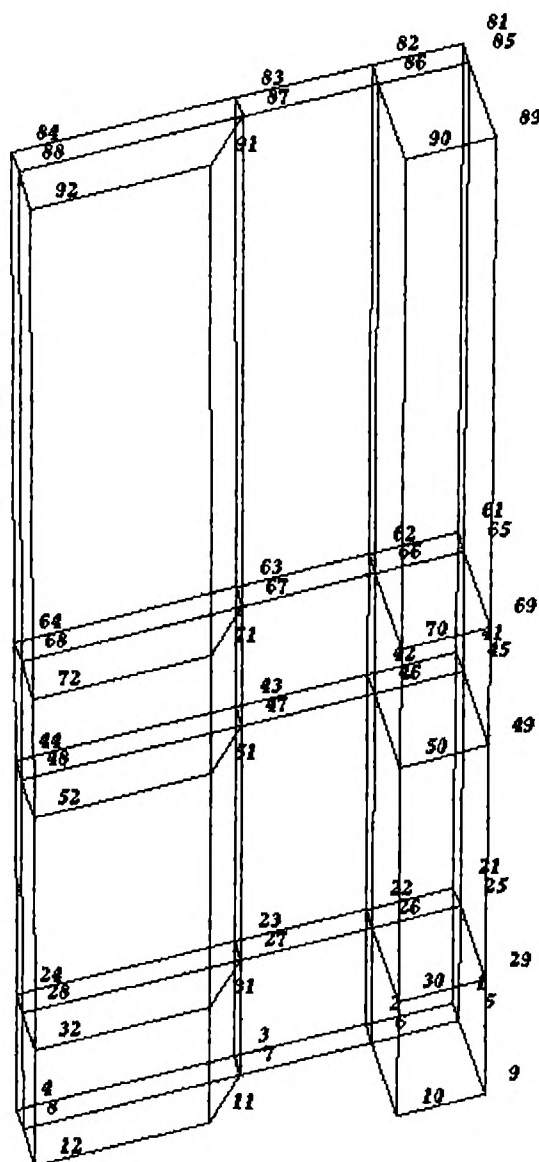


Rys. 9. Spadek ciśnienia ( $p$ ) w kierunku przepływu (osi  $z$ ) w kanale formującym oraz w obszarze swobodnego kształtowania się strugi

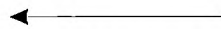
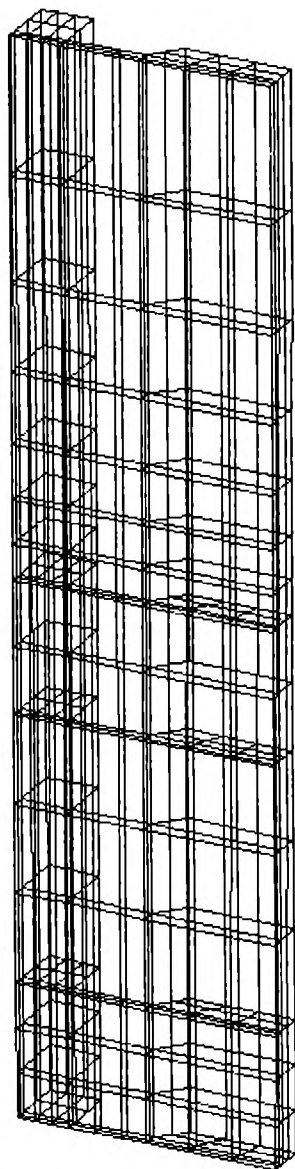
Fig. 9. Pressure ( $p$ ) drop along the channel ( $z$ -axis) that shapes the swell and in the region where the swell shapes itself

Rys. 10. Warunki brzegowe przepływu przez kanał o złożonej charakterystyce geometrycznej: BS1 — wpływ (płaszczyzna 1, 4, 12, 11, 7, 6, 10, 9), BS2 — płaszczyzna symetrii (1, 4, 84, 81), BS3 — ściany kanału (1, 4, 64, 61; 1, 9, 69, 61 itd.), BS4 — powierzchnia swobodna (61, 69, 89, 81), BS5 — powierzchnia swobodna (69, 70, 90, 89), BS6 — powierzchnia swobodna (70, 66, 86, 90), BS7 — powierzchnia swobodna (66, 67, 87, 86), BS8 — powierzchnia swobodna (67, 71, 91, 87), BS9 — powierzchnia swobodna (71, 72, 92, 91), BS10 — powierzchnia swobodna (64, 72, 92, 84), BS11 — wypływ (81, 84, 92, 91, 87, 86, 90, 89)

Fig. 10. Boundary conditions for the inverse extrudate swell 3-D problem in a complicate geometry system: BS1 — inflow plane (1, 4, 12, 11, 7, 6, 10, 9), BS2 — symmetry plane (1, 4, 84, 81), BS3 — channel walls (1, 4, 64, 61; 1, 9, 69, 61 and so on), BS4 — free surface (61, 69, 89, 81), BS5 — free surface (69, 70, 90, 89), BS6 — free surface (70, 66, 86, 90), BS7 — (66, 67, 87, 86), BS8 — free surfa-

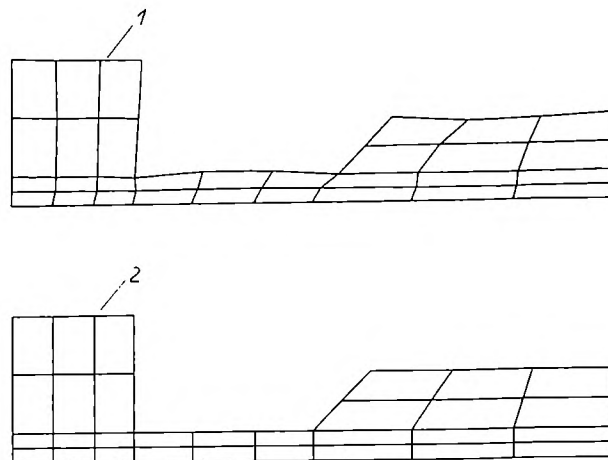


ce (67, 71, 91, 87), BS9 — free surface (71, 72, 92, 91), BS10 — free surface (64, 72, 92, 84), BS11 — outflow (81, 84, 92, 91, 87, 86, 90, 89)



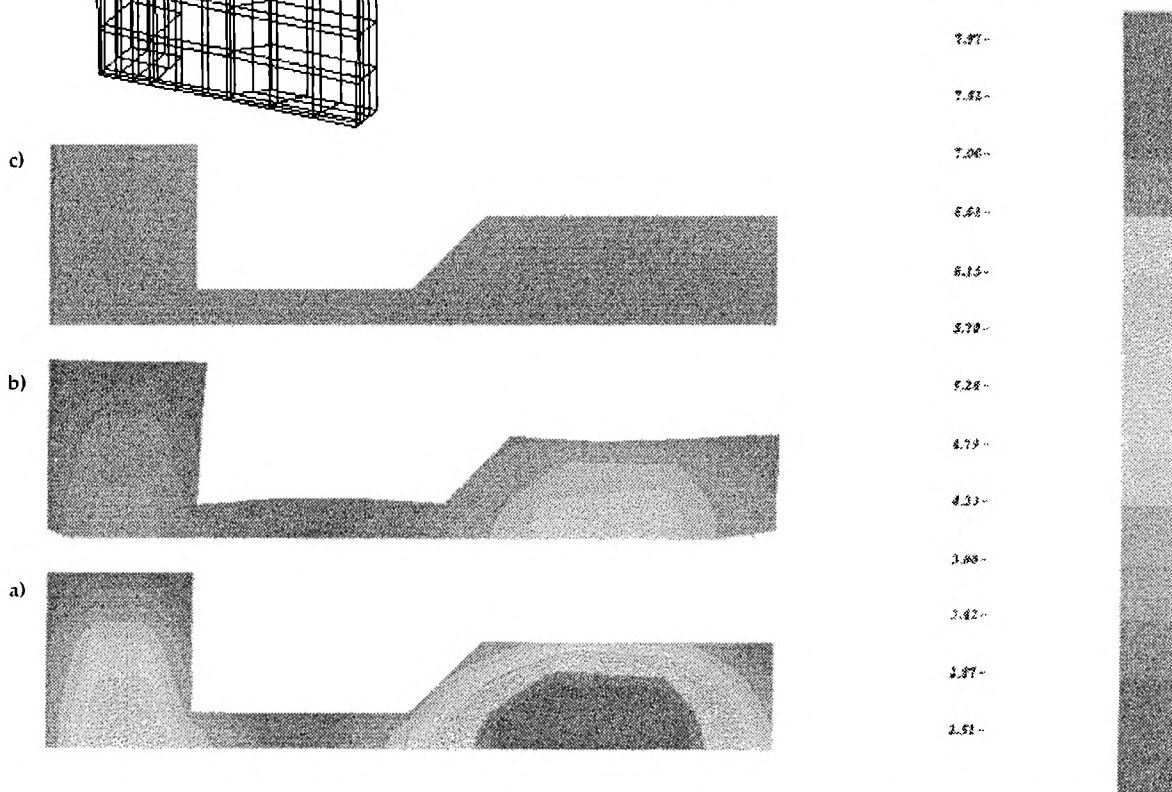
Rys. 11. Pierwotna globalna siatka elementów skończonych (por. rys. 10)

Fig. 11. The initial global mesh of finite elements (cf. Fig. 10)



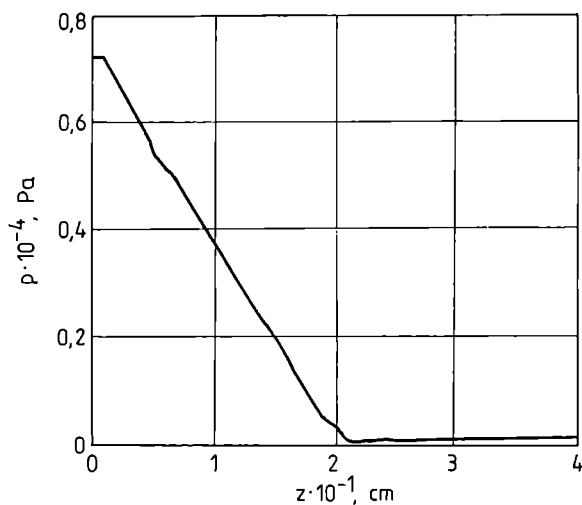
Rys. 12. Charakterystyka geometryczna (przekrój poprzeczny siatki elementów skończonych) ustnika formującego (podobszar stały) (1) na tle zadanej charakterystyki geometrycznej (siatki elementów skończonych przekroju poprzecznego) strugi tworzywa (2)

Fig. 12. The geometrical characteristics of (1) the die lip section (cross section of the mesh of finite elements) (constant subdomain) compared with the outlet section (mesh of finite elements in the cross section) of the swell (2)



Rys. 13. Rozkład prędkości  $v_z$  (w cm/s) w przekroju poprzecznym rozpatrywanego przepływu w trzech płaszczyznach: u wlotu do podobszaru ustalonego (a), na początku podobszaru swobodnego (tj. u wylotu ustnika) (b) i na końcu podobszaru swobodnego (c)

Fig. 13. Distribution of velocities  $V_z$  (cm/s) considered in three planes, viz., in the section of (a) inflow into constant subdomain, (b) inlet into free jet (die lip section) and (c) outlet (end of free jet)



Rys. 14. Spadek ciśnienia ( $p$ ) w kierunku przepływu (osi  $z$ ) w kanale formującym oraz w obszarze swobodnego kształtowania się strugi

Fig. 14. Pressure ( $p$ ) drop along the channel ( $z$ -axis) that shapes the swell and in the region where the swell shapes itself

#### PODSUMOWANIE

Przedstawiliśmy metodykę modelowania za pomocą systemu POLYFLOW problemu odwrotnego do problemu kształtowania strugi tworzywa wypływającego z kanału formującego, np. z głowicy wylączarskiej (*inverse extrudate swell problem*). Zagadnienie to rozpa-

trzyliśmy w odniesieniu do uogólnionych cieczy newtonowskich. Dokonailiśmy analizy dwóch wybranych przepływów trójwymiarowych: o stosunkowo prostej (prostokątnej) charakterystyce geometrycznej i o złożonej charakterystyce geometrycznej.

Stwierdziliśmy, że przedstawiona metodyka modelowania może znaleźć zastosowanie do analizy przepływów uogólnionych cieczy newtonowskich w kanałach o różnej, w zasadzie dowolnie złożonej charakterystyce geometrycznej. Stanowiąc więc ona może użyteczne narzędzie projektowania, np. głowic wylączarskich.

#### LITERATURA

1. Wilczyński K., Tyszkiewicz A.: *Polimery* 1996, **41**, 107.
2. Wilczyński K., Łączyński B., Czaplarski A.: *Polimery* 1998, **43**, 115.
3. Wilczyński K., Łączyński B., Szymaniak Z.: *Polimery* 1999, **44**, 683.
4. Bird B. B., Armstrong R. C., Hassager O.: "Dynamics of Polymeric Liquids", tom 1.: "Fluid Mechanics", Wiley 1989.
5. Crochet M. J. i in.: "System komputerowego modelowania procesów przetwórstwa tworzyw sztucznych — POLYFLOW", Polyflow SA, Louvain-la-Neuve 1993, Belgia.

Otrzymano 28 VI 1999 r.