

Do podstawowych zadań przetwórstwa należy nie tylko właściwe przygotowanie kompozycji polimerowych oraz wytworzenie z nich wyrobów użytkowych o pożądanych cechach eksploatacyjnych, lecz także wykonanie tego jak najmniejszym kosztem. W procesach wytłaczania i wtrysku fundamentalne znaczenie ma tutaj etap uplastyczniania. Symulacja procesu uplastyczniania przy wytłaczaniu było przedmiotem wielu kompleksowych opracowań. Czy istnieje możliwość komputerowej symulacji procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu?

KOMPUTEROWA SYMULACJA PROCESU UPLASTYCZNIANIA POLIMERÓW PODCZAS WTRYSKIWANIA ■ CZ. 1

Dążąc do optimum

■ Uplastycznianie – wtrysk a wytłaczanie

Jednym z elementów umożliwiających minimalizację kosztów wytwarzania jest optymalny dobór konstrukcji maszyn przetwórczych oraz warunków przetwarzania. Stwierdzenie to dotyczy także metod przetwórczych, u podstaw których leżą procesy transportu ślimakowego. Należą do nich zwłaszcza procesy wytłaczania oraz wtryskiwania ślimakowego, które pod względem ilości przerabianych tworzyw stanowią absolutną czołówkę wśród wszystkich metod przetwórstwa tworzyw sztucznych. Ogólnie mówiąc zarówno wytłaczanie, jak i wtryskiwanie obejmują dwa etapy, tj. uplastycznianie i formowanie, które wywierają decydujący wpływ na jakość wyrobów oraz koszty ich wytworzenia. Podstawowym zadaniem etapu uplastyczniania jest otrzymanie w sposób stabilny z możliwie

dużą wydajnością i przy możliwie małym nakładzie energii uplastycznionego tworzywa o możliwie najlepszej jednorodności (homogenizacji) materiałowej i termicznej. W zależności od charakteru procesu zadania te mogą być traktowane z różnym naciskiem. Tak więc w przypadku wytłaczania homogenizującego związane z przygotowaniem kompozycji podstawową rolę odgrywa dobra homogenizacja materiałowa przy minimalnym koszcie energetycznym, podczas gdy dla wytłaczania formującego większy nacisk należy położyć na problemy homogenizacji termicznej i stabilności, które determinują dokładność wymiarową wyrobów. Ten ostatni przypadek można w pewnej mierze odnieść również do uplastyczniania przy wtryskiwaniu, chociaż z uwagi na zupełnie różną dynamikę obu procesów analogia ta jest mocno ograniczona. W przypadku wy-

tłaczania – procesu o charakterze ciągłym – uplastycznianie przebiega w warunkach równowagi dynamicznej. Stan równowagi zakłócany może być jedynie przez losowe fluktuacje parametrów o charakterze białego szumu. W przypadku wtryskiwania – procesu periodycznego – uplastycznianie zachodzi w warunkach pełnej nierównowagi dynamicznej. Oznacza to, że w trakcie jednego cyklu wtryskowego parametry procesu podlegają zmianom w czasie niezależnym od możliwych zakłóceń o charakterze losowym. W aspekcie kilku cykli wtryskowych można mówić co najwyżej o „kwazirównowadze dynamicznej” tego procesu, rozumianej jako stałość parametrów w tych samych momentach różnych cykli wtryskiwania. Ponadto istnieją dwa dodatkowe elementy, które w sposób bardzo istotny odróżniają dynamikę pracy układu uplastyczniającego podczas wtry-

skiwania i wytłaczania. Pierwszy z nich wynika z faktu, że stapienie tworzywa przy wtryskiwaniu ma charakter zarówno statyczny (przy nieruchomym ślimaku), jak i dynamiczny (przy ślimaku obracającym się), podczas gdy przy wytłaczaniu ma ono charakter wyłącznie dynamiczny. Drugi element wpływający na dynamikę procesu to ruch posuwisto – zwrotny ślimaka związany z etapem uplastyczniania dynamicznego oraz wtrysku tworzywa do formy. Ruch ten dodatkowo zmienia położenie stref roboczych ślimaka w czasie oraz warunki przepływu tworzywa w kanale ślimaka. Zaniedbując w pierwszym przybliżeniu istnienie tego ruchu można ogólnie stwierdzić, że im dłuższy czas rotacji ślimaka wtryskowego, tym bardziej warunki uplastyczniania przy wtryskiwaniu zbliżają się do warunków uplastyczniania w procesie wytłaczania.

■ **Podejście teoretyczne**

Omówione różnice w procesie uplastyczniania przy wytłaczaniu i wtryskiwaniu znajdują swoje odbicie w odmiennym ukształtowaniu geometrycznym układów uplastyczniających, zwłaszcza ślimaków we wtryskarkach i wytłaczarkach. Optymalizacja geometrii tych układów wykorzystywała przez długi czas jedynie duże doświadczenie i wycucie konstruktorów oraz technologów. W ostatnich latach coraz większego znaczenia nabiera podejście teoretyczne. Związane jest ono z tworzeniem matematycznych modeli procesu uplastyczniania w oparciu o prawa zachowania masy, pędu i energii oraz o charakterystykę materiału. Modele te wiążą podstawowe charakterystyki uplastyczniania danego tworzywa z geometrią układu uplastyczniającego, umożliwiając tym samym optymalizację rozwiązań konstrukcyjnych. Podejście takie umożliwił szybki rozwój techniki obliczeniowej, obejmującej moc obliczeniową komputerów, programowanie oraz metody numeryczne. Należy w tym miejscu wspomnieć, że podejście empiryczne i teoretyczne wzajemnie się inspirują i uzupełniają (rys 1).

Teoretyczne podejście do procesu uplastyczniania poprzez tworzenie komputerowych modeli symulacyjnych tego procesu nabrało istotnego rozmachu zwłaszcza w przypadku wytłaczania. Dotychczas brak jest jednak równie kompleksowego podejścia do tematyki uplastyczniania przy wtryskiwaniu. Główną przyczyną tych dysproporcji należy upatrywać w znacznie bardziej skomplikowanej dynamice tego procesu, prowadzącej w konsekwencji do zwiększenia problemów opisowych oraz interpretacyjnych.

Dość znaczne podobieństwo układów uplastyczniających wytłaczarek oraz wtryskarek ślima-

kowych sugeruje, że mechanizmy uplastyczniania w obu układach są w pewnym stopniu do siebie podobne. Zasadnicze różnice wynikają z odmiennej dynamiki pracy wtryskarek i wytłaczarek, wyrażającej się m.in. cykliczną rotacją przy wstecznym ruchu ślimaka wtryskowego. Z tego względu proces uplastyczniania przy wytłaczaniu można traktować jako graniczny przypadek procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu, odpowiadający nieskończonemu czasowi rotacji ślimaka (przy pominięciu jego ruchu wstecznego). Stąd też matematyczny model wytłaczania umożliwiający symulację i optymalizację procesów rzeczywistych może być traktowany jako punkt wyjścia do zbudowania podobnego modelu działania układu uplastyczniającego wtryskarki.

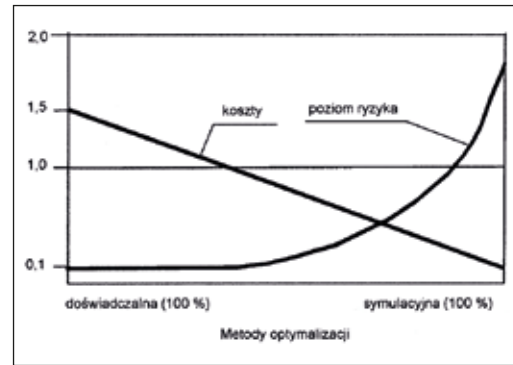
■ **Upłastycznianie przy wtryskiwaniu**

Tendencje rozwojowe w zakresie maszyn do przetwórstwa tworzyw sztucznych idą głównie w kierunku wzrostu wydajności i niezawodności ich działania, jak również zmniejszenia nakładów energetycznych oraz ogólnych kosztów produkcji. W przypadku wtryskarek ślimakowych do przetwórstwa tworzyw sztucznych, wyraźnie widoczne są trzy podstawowe tendencje:

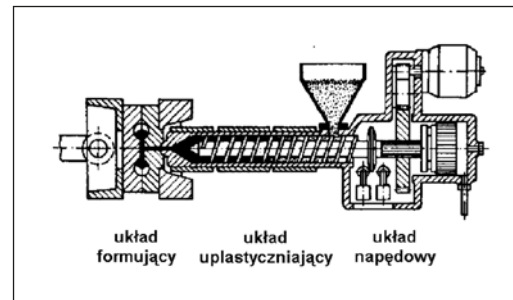
- poprawa technik zasilania materiałem stałym,
- zwiększenie wydajności uplastyczniania przez dobór odpowiedniej geometrii kanałów przepływowych,
- poprawa wydajności homogenizacji oraz transportu przy stosunkowo niskiej temperaturze stopionego tworzywa.

Zamierzenia te są realizowane poprzez:

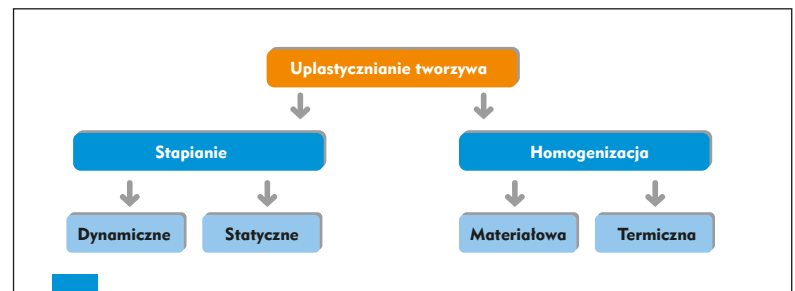
- zastosowanie dodatkowego oprzyrządowania do trans-



Rys. 1. Poglądowa zależność kosztów optymalizacji ślimaka wytłaczarskiego oraz ryzyka konstrukcyjnego od zastosowanej metody optymalizacji (metody doświadczalne oraz symulacyjne programy komputerowe)



Rys. 2. Schemat ideowy wtryskarki ślimakowej (Opracowano na podst: Smorawiński A., Technologia wtrysku, WNT, Warszawa 1984, s. 70)



Rys. 3. Podstawowe zadania układu uplastyczniającego wtryskarki

- portu materiału sypkiego,
- właściwy dobór geometrii kanałów przepływowych,
- poprawę systemów regulacji oraz sterowania procesem.

Rozwiązując powyższe zagadnienia tak od strony teoretycznej, jak i praktycznej, należy uwzględnić również rodzaj tworzywa, a więc jego specyficzne właściwości reologiczne i fizykochemiczne, jak również związaną z tym specyficzną techniką przetwórstwa (np. odgazowanie) oraz wymagania stawiane wyrobom (np. orientacja materiału).

Na rysunku 2 przedstawiono schemat ideowy wtryskarki, która składa się z trzech podstawowych układów:

- układu uplastyczniającego, którego zadaniem jest uplastycznienie tworzywa, a następnie wytworzenie odpowiedniego ciśnienia umożliwiającego wtrysnięcie go do formy,
- układu formującego, którego zadaniem jest ukształtowanie materiału, a następnie przez odprowadzenie lub doprowadzenie ciepła zestalenie go z zachowaniem nadanego kształtu,
- układu napędowego, mającego za zadanie m.in. wprawienie ślimaka w ruch obrotowy i posuwisto – zwrotny.

Upłastycznianie tworzywa w układzie uplastyczniającym

wtryskarki ma na celu dwa podstawowe zadania, którymi są stopienie materiału, a następnie jego homogenizacja (rys. 3).

Stapianie tworzywa we wtryskarce (w odróżnieniu od wytłaczarki) charakteryzuje się istnieniem dwóch różnych mechanizmów:

- Stapianie statyczne przy nieruchomym ślimaku. Stapianie to zachodzi w czasie $t_w + t_d$ (sumaryczny czas wystoju ślimaka w położeniu tylnym oraz przednim). Oba czasy są w procesie wtryskiwania wielkościami regulowanymi.
- Stapianie dynamiczne podczas rotacji i ruchu wstecznego ślimaka w czasie t_r . Czas rotacji t_r (stapiania dynamicznego) jest wielkością nie podlegającą bezpośredniej regulacji, lecz wynika z przebiegu procesu.

Homogenizację podzielić można na dwa rodzaje: materiałową i termiczną, określane odpowiednio jako wielkość niejednorodności materiałowych oraz różnic temperatur w stopie.

Teoretyczny model procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu powinien pozwalać na prze-

widywanie wartości wielkości wyjściowych procesu na podstawie danych wejściowych. W konsekwencji model taki powinien stanowić narzędzie optymalizacji tego procesu. Model taki musi być bardziej złożony w porównaniu do modelu procesu uplastyczniania przy wytłaczaniu, ponieważ wtryskiwanie w przeciwieństwie do wytłaczania jest procesem nieustalonym w czasie. Jednak pewne fragmenty obu modeli muszą być dość podobne, choćby z racji ogólnego podobieństwa układu uplastyczniającego wtryskarki i wytłaczarki.

Model symulacyjny uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu

Proces wytłaczania ma charakter ciągły. Po odpowiednio długim czasie od chwili jego zapoczątkowania ustala się w nim stan równowagi dynamicznej, charakteryzujący się stosunkowo niewielkimi, przypadkowymi wahaniami podstawowych parametrów roboczych w czasie. Wielkość tych wahań określa stabilność procesu.

Podczas procesu wtryskiwania, stanowiącego proces periodyczny, ślimak pracuje w warunkach stałej nierównowagi dynamicznej, tym większej, im krótszy jest czas pojedynczego cyklu wtryskiwania. Brak równowagi dynamicznej wyrażającej się istnieniem dynamicznego i statycznego okresu stapiania, decyduje o przebiegu stapiania tworzywa, zmniejszając zwłaszcza efektywną długość ślimaka wtryskowego w porównaniu z analogicznym ślimakiem do wytłaczania. Konieczność uwzględnienia takich czynników jak zmiana mechanizmu stapiania tworzywa w chwili przejścia ślimaka ze stanu dynamicznego (rotacja) w stan statyczny (bezruch) i odwrotnie oraz ruch posuwisto – zwrotny ślimaka powodują, że równania

opisujące proces uplastyczniania przy wtryskiwaniu są znacznie bardziej skomplikowane w porównaniu z odpowiednimi równaniami dla procesu wytłaczania. Prawdopodobnie z tego właśnie względu w literaturze istnieje znacznie mniej publikacji dotyczących symulacji procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu, które mają ponadto charakter fragmentaryczny i nie opisują procesu uplastyczniania w sposób pełny. Z tego powodu zamierzeniem autorów było stworzenie kompleksowego modelu matematycznego, a następnie programu komputerowego, służącego do symulacji tego procesu. Program ten na podstawie danych wejściowych, obejmujących w szczególności charakterystykę geometryczną układu uplastyczniającego, parametry pracy wtryskarki oraz niezbędne dane materiałowe polimerów, powinien być w stanie wyznaczyć odpowiednie charakterystyki wyjściowe, obejmujące przede wszystkim profile złoza stałego, temperatury oraz ciśnienia na długości ślimaka, wartość poboru mocy, wydatku masowego uplastycznionego tworzywa itd.

Program taki (tzw. model symulacyjny) musi być oparty na modelu matematycznym, który opisuje za pomocą odpowiednich równań matematycznych model fizyczny zjawisk zachodzących w układzie uplastyczniającym. Schematycznie proces modelowania i symulacji komputerowej przedstawiono na rys. 4.

Parametry wejściowe modelu symulacyjnego

Na pracę układu uplastyczniającego zarówno wytłaczarki, jak i wtryskarki mają wpływ trzy podstawowe grupy parametrów:

- 1) parametry geometryczne układu uplastyczniającego (ślimaka),

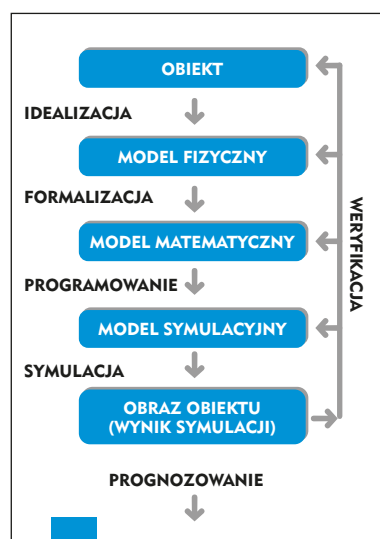
- 2) parametry robocze pracy wtryskarki,
- 3) parametry materiałowe tworzywa stałego i uplastycznionego.

Parametry geometryczne ślimaka

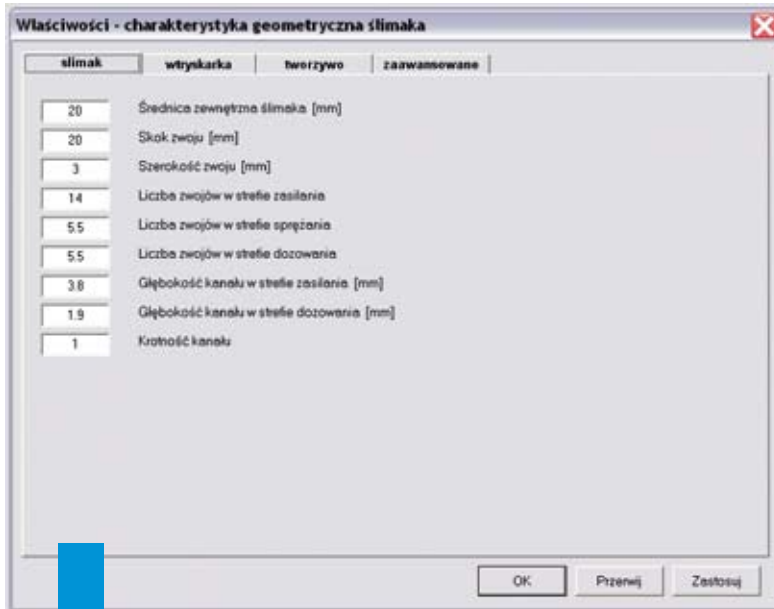
Omawiany model odnosi się do ślimaka trójstrefowego o stałej średnicy zewnętrznej D , skoku zwoju S , szerokości zwoju e , kącie wzniosu linii śrubowej φ oraz krotności kanału K . Podział ślimaka na strefy geometryczne opisywany jest ilością zwojów w poszczególnych strefach: N_1 – w strefie zasilania, N_2 – w strefie sprężania oraz N_3 – w strefie dozowania. Geometryczne strefy zasilania i dozowania charakteryzują się stałą wysokością kanału wynoszącą odpowiednio H_z i H_d . Wysokość kanału w strefie sprężania zmienia się liniowo od H_z do H_d . Długość poszczególnych stref można zmieniać w dowolnych granicach, uzyskując w skrajnych przypadkach ślimak o stałej lub zmiennej głębokości na całej długości kanału, a także dwa różne rodzaje ślimaków dwustrefowych. Parametry geometryczne D , S , e , N_1 , N_2 , N_3 , H_z , H_d i K wprowadza się jako dane wejściowe do obliczeń (rysunek 5).

Parametry robocze wtryskarki

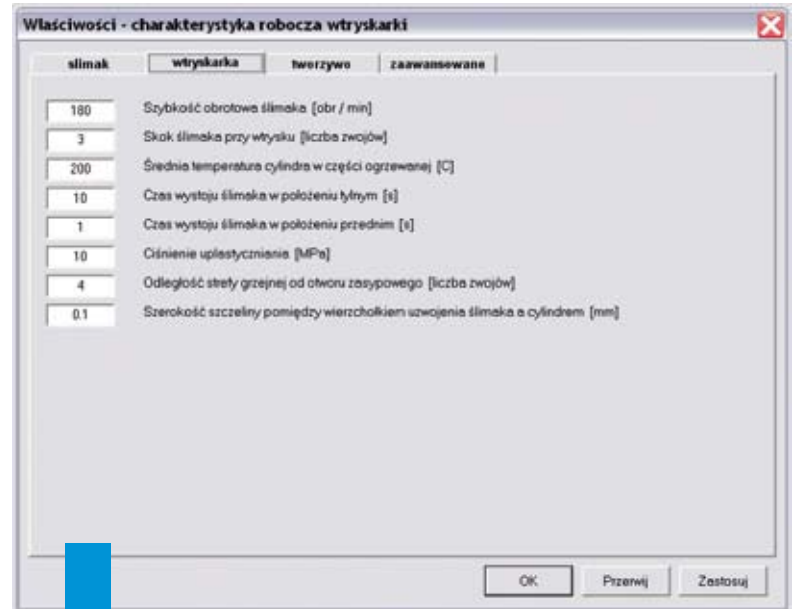
Przyjęto, że regulowanymi parametrami roboczymi pracy wtryskarki są: szybkość obrotowa ślimaka N , skok ślimaka przy wtrysku N_s , średnia temperatura T_b cylindra w części ogrzewanej, ciśnienie uplastyczniania p_p (ciśnienie panujące przed ślimakiem w czasie jego ruchu wstecznego) oraz czas t_0 w którym ślimak jest w stanie spoczynku. Jak już wspomniano, ta ostatnia wielkość stanowi sumę dwóch czasów odpowiadających czasowi t_d wystoju ślimaka w położeniu



Rys. 4. Schemat blokowy procesu modelowania matematycznego i symulacji komputerowej.



Rys. 5. Parametry geometryczne ślimaka, które należy wprowadzić do modelu



Rys. 6. Parametry robocze wtryskarki, które należy wprowadzić do modelu

przednim (czasowi docisku) oraz czasowi t_w jego wystoju w położeniu tylnym (czasowi chłodzenia). Czas t_0 określa statyczne stapanie tworzywa w ogrzewanej części cylindra.

Oprócz powyższych danych należy podać pewne dane geometryczne nie związane z charakterystyką ślimaka, czyli szerokość szczeliny pomiędzy wierzchołkami uzwojenia ślimaka a powierzchnią cylindra δ_R oraz odległość pomiędzy lejem zasypowym a początkiem strefy grzejnej N_4 .

Parametry $N, N_5, T_b, t_w, t_d, p_p, N_4$ oraz δ_R są wprowadzane jako dane wejściowe do obliczeń (rys. 6).

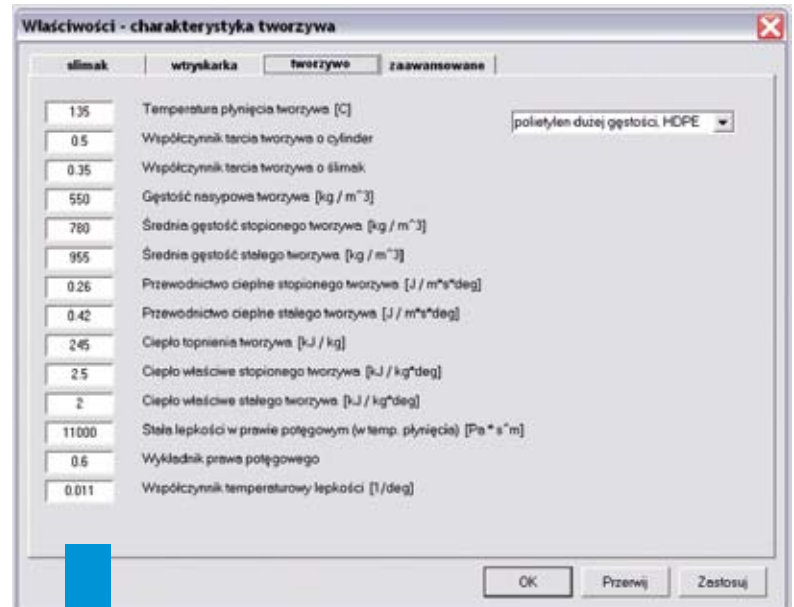
Parametry materiałowe

Do celów obliczeniowych w niniejszym modelu niezbędna jest znajomość takich właściwości fizykochemicznych tworzywa jak temperatura topnienia (płynięcia) T_m , średnie współczynniki tarcia tworzywa o cylinder f_c oraz o ślimak f_s , gęstości materiału: gęstość nasypową ρ_0 , gęstość tworzywa stałego ρ_s oraz stopionego ρ_m , jak również średnie przewodnictwa cieplne tworzywa stałego k_s oraz stopionego k_m , ciepło top-

nienia tworzywa λ (dla tworzyw semikrystalicznych) oraz średnie ciepła właściwe tworzywa stałego c_s oraz stopionego c_m . Przyjęto, że wielkości te są stałymi niezależnymi od temperatury i ciśnienia. Niezbędne są również pewne dane reologiczne materiału, takie jak stała lepkości m_0 w prawie potęgowym, wykładnik równania potęgowego lepkości n oraz współczynnik temperaturowy lepkości a . Wielkości $T_m, f_c, f_s, \rho_0, \rho_s, \rho_m, k_s, k_m, \lambda, c_s, c_m, m_0, n$ oraz a należy wprowadzić jako dane wejściowe do obliczeń (rys. 7), przy czym dla podstawowych polimerów dane te zostały w modelu już zamieszczone. Wartości te zostały przyjęte jako średnie z różnych danych literaturowych.

Przebieg obliczeń

Problem modelowania procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu musi być rozwiązany przy zastosowaniu odpowiedniego cyklu obliczeniowego. Jedną z podstaw umożliwiających zbudowanie programu symulującego proces uplastyczniania przy wtryskiwaniu było rozwiązanie problemu wyznaczenia szybkości ruchu wstecznego ślimaka U oraz profilu ciśnienia tworzywa, a zwłaszcza

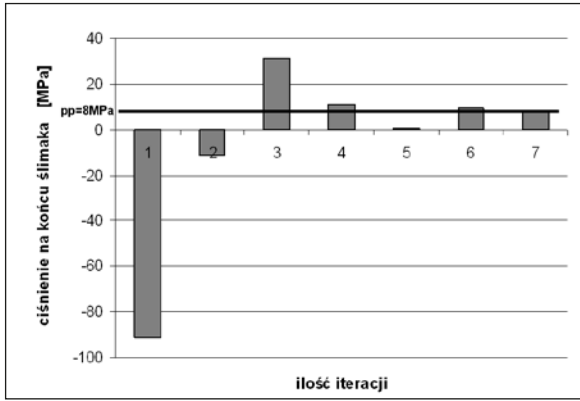


Rys. 7. Właściwości fizykochemiczne oraz reologiczne tworzywa, które należy wprowadzić do modelu

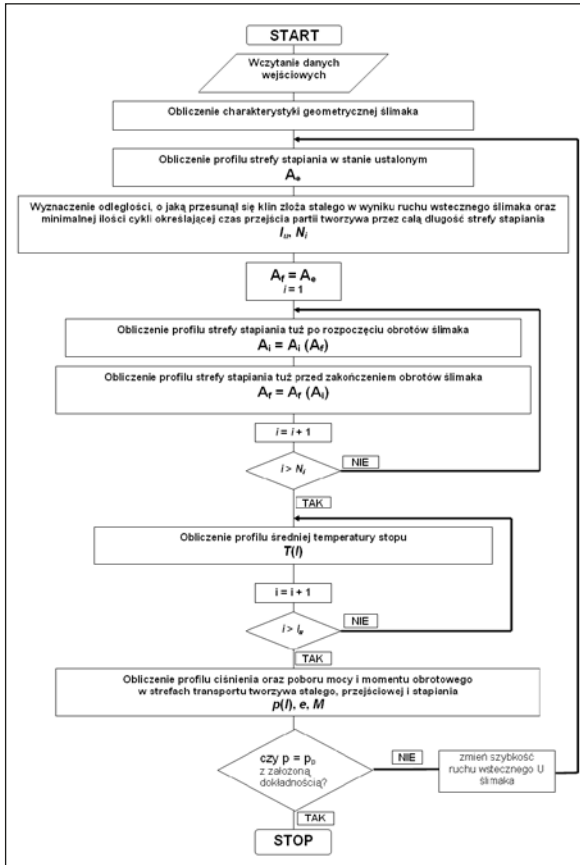
cza ciśnienia na końcu ślimaka. Wielkości te są wzajemnie zależne od siebie (uwikłane), niemożliwe jest więc obliczenie jednej z nich bez znajomości drugiej. Wyznaczenie ich umożliwi zamknięcie cyklu obliczeniowego (duża pętla sprzężenia zwrotnego na rys. 9), dając równocześnie jako wyniki odpowiednie wartości takich parametrów jak profil złoza stałego (stopień wypełnienia kanału ślimaka materiałem niestopionym), temperatury, ciśnienia, wartość poboru mocy,

wydatku masowego uplastycznego tworzywa itd.

Chociaż oba wymienione wcześniej zadania uplastyczniania, stapanie i homogenizacja mają bardzo duże znaczenie w poprawnym przebiegu procesu wtryskiwania, przedstawiony model kładzie główny nacisk przede wszystkim na zagadnienia związane ze stapaniem tworzywa, pomimo iż wyniki modelowania pozwalają określić podstawowe wielkości opisujące homogenizację materiałową i termicz-



Rys. 8. Przykładowa zależność przedstawiająca zbieżność obliczeń dla zadanej wartości ciśnienia uplastyczniana równej 8 MPa



Rys. 9. Algorytm modelu symulacyjnego procesu uplastyczniania polimerów przy wtryskiwaniu

ną, a więc zawartość stopu na końcu ślimaka oraz fluktuacje temperatury stopu.

Zgodnie z zasadą działania układu uplastyczniającego wtryskarki, wartość ciśnienia na końcu ślimaka p musi być równa założonemu ciśnieniu uplastyczniania p_p . Przy ustalonej charakterystyce roboczej, powyższą równość uzyskać można w modelu poprzez właściwy dobór szybkości ruchu wstecznego ślimaka U , bezpośrednio związanej z wydatkiem uplastyczniania. Jest to możliwe przy zastosowaniu

metody iteracji z użyciem odpowiedniego algorytmu określającego zmiany szybkości ruchu wstecznego ślimaka w zależności od obliczonego ciśnienia na wyjściu oraz założonego ciśnienia uplastyczniania. Algorytm taki ma charakter doświadczalny, a jedynym kryterium jego doboru jest zapewnienie szybkiej zbieżności obliczeń niezależnie od założonej charakterystyki materiałowej, geometrycznej oraz parametrów pracy.

Przebieg obliczeń jest następujący:

Po wprowadzeniu niezbędnych danych, należących do trzech omawianych wcześniej grup parametrów modelu, model przyjmuje pewną początkową wartość szybkości ruchu wstecznego U obliczając dla tej wartości profil złoza stałego, temperatury oraz ciśnienia na całej długości ślimaka (w tym ciśnienie p na końcu ślimaka). W dalszej kolejności program oblicza nową szybkość ruchu wstecznego, a na jej podstawie nowe profile złoza stałego, temperatury, ciśnienia oraz ciśnienie na końcu ślimaka. Profile te zostają obliczone wykorzystując zaproponowane modele matematyczne dla różnych stref dynamicznych układu uplastyczniającego wtryskarki, a więc dla stref zasobnika, transportu tworzywa stałego, uplastyczniania wstępnego, uplastyczniania właściwego oraz transportu stopu. Działania te powtarzają się do chwili uzyskania zgodności p oraz p_p z założoną dokładnością. Wyznaczona przy tym szybkość U określa jednoznacznie wydatek uplastyczniania, zapotrzebowanie mocy oraz inne charakterystyki procesu. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy wykres przedstawiający zbieżność obliczeń w kolejnych pętlach obliczeniowych (iteracjach) ciśnienia p na końcu ślimaka do zadanej wartości p_p .

Symulacja procesu uplastyczniania przy wtryskiwaniu przebiega wg algorytmu przedstawionego na rysunku 9. Pogrubioną linią zaznaczono najważniejsze sprzężenia zwrotne, występujące w modelu. Obliczenia przeprowadzane są stopniowo, na ustalonych wstępnie odcinkach elementarnych, na których parametry robocze, geometryczne oraz materiałowe traktowane są jako stałe. Wartości wielkości obliczonych w danym odcinku elementarnym są danymi wejściowymi do obliczeń na odcinku następnym.

Należy również dodać, że program wyposażony został w różnego typu zabezpieczenia, obejmujące zarówno ograniczenia uniemożliwiające wprowadzenie nierealnych danych wejściowych, np. wielkości skoku powodującego wysunięcie ślimaka z cylindra, jak również proste zabezpieczenia kontrolujące rząd wielkości wprowadzonych danych wejściowych.

Ryszard Steller,
Jacek Iwko
Politechnika Wroclawska

