

MECHANIKA

CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1-M/2009

ZESZYT 3

ROK 106

ISSUE 3

YEAR 106

KRZYSZTOF WILCZYŃSKI, JACEK GARBARSKI, ANDRZEJ NASTAJ,
ADRIAN LEWANDOWSKI, KRZYSZTOF J. WILCZYŃSKI*

MODEL KOMPUTEROWY PROCESÓW WYTŁACZANIA I WTRYSKIWANIA

COMPUTER MODEL FOR POLYMER EXTRUSION AND INJECTION MOLDING

Streszczenie

Prezentowano wielozadaniowy system komputerowego modelowania procesów wytłaczania i wtryskiwania tworzyw polimerowych. Podano podstawy fizyczne i metodyczne systemu, wskazując na dwa algorytmy obliczeń: postępujący i wsteczny. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji procesu wytłaczania jednoślismakowego i wytłaczania dwuślismakowego przeciwbieżnego.

Słowa kluczowe: modelowanie, wytłaczanie, wtryskiwanie, optymalizacja.

Abstract

MultiScrew computer system has been presented for modeling of the polymer screw processing. Physical fundamentals of the system and computation algorithms (forward and backward) are discussed, as well as some examples of simulations are presented for single screw extrusion and counter-rotating twin screw extrusion.

Keywords: computer modeling, extrusion, injection molding, optimization

* Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilczyński, dr hab. inż. Jacek Garbarski, prof. PW, dr inż. Andrzej Nastaj, mgr inż. Adrian Lewandowski, mgr inż. Krzysztof J. Wilczyński, Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska.

1. Wprowadzenie

Systemy komputerowego modelowania procesów przetwórstwa tworzyw można podzielić na systemy o przeznaczeniu ogólnym oraz systemy specjalizowane, tzn. przeznaczone do symulacji określonych procesów przetwórczych, np. wytłaczania czy wtryskiwania. Ogólnie biorąc, działanie tych systemów polega na rozwiązywaniu równań zachowania mechaniki ośrodków ciągłych: masy (1), ruchu (2) i energii (3) dla określonych modeli materiału (4), w określonych warunkach przepływu [1,2]:

$$D\rho/Dt + \rho \operatorname{div} v = 0 \quad (1)$$

$$\rho (Dv/Dt) = - \operatorname{grad} p + \operatorname{div} \tau + g \quad (2)$$

$$\rho c_p (DT/Dt) = k \nabla^2 T + \tau : \operatorname{grad} v \quad (3)$$

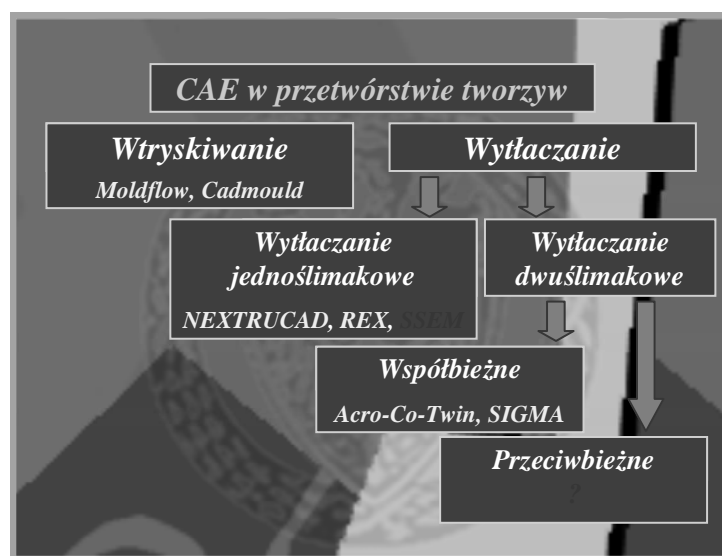
$$\tau = f(D) \quad (4)$$

gdzie:

- ρ - gęstość,
- $D\rho/Dt$ - pochodna zupełna gęstości,
- t - czas, v - prędkość,
- Dv/Dt - pochodna zupełna prędkości,
- p - ciśnienie,
- τ - tensor extra-naprężenia,
- g - siła ciężkości,
- c_p - ciepło właściwe,
- DT/Dt - pochodna zupełna temperatury,
- k - przewodność cieplna, T - temperatura,
- D - tensor szybkości odkształcenia.

Modelowanie procesów przetwórczych przy zastosowaniu systemów o przeznaczeniu ogólnym (ang. Computational Fluid Dynamics, CFD), np. POLYFLOW-FLUENT [3], POLYCAD [4] czy SUNDYBASIC [5], wymaga zdefiniowania rozpatrywanego zagadnienia, zgodnie z zasadami mechaniki ośrodków ciągłych. Zastosowanie tych programów nie jest ograniczone do ściśle określonego procesu. Stanowią one narzędzia rozwiązywania równań zachowania, w odniesieniu do różnorodnych, w zasadzie dowolnie definiowanych warunków przepływu. Nie są jednak uniwersalne, gdyż nie umożliwiają, m.in., kompleksowego modelowania przepływu w układach ślimakowych wytłaczarek i wtryskarek, obejmującego również transport tworzywa w stanie stałym i uplastycznianie tworzywa.

Druga grupa systemów jest przeznaczona do symulacji określonych procesów przetwórczych, głównie wtryskiwania i wytłaczania (rys.1). W grupie systemów symulacji procesu wtryskiwania (płynięcia tworzywa w formach wtryskowych) podstawowe znaczenie mają programy MOLDFLOW [6], CADMOULD [7] oraz MOLDEX3D [8]. Warto zwrócić uwagę, że istnieje tylko jeden system kompleksowej symulacji przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki, a mianowicie program PSI [9]. Ważne są również w tym zakresie ostatnie prace Stellera oraz Iwko [10].



Rys. 1. Wazniejsze systemy CAE w przetwórstwie tworzyw

Fig. 1. CAE systems for polymer processing

W grupie systemów symulacji procesu wytłaczania jednoślakowego można wyróżnić programy: NEXTRUCAD [4], REX [9] czy SSEM [11]. Pełna symulacja wytłaczania dwuślakowego współbieżnego jest możliwa na podstawie programów AKRO-CO-TWIN [12], SIGMA [9] czy LUDOVIC [13]. Nie ma natomiast jeszcze na rynku oprogramowania umożliwiającego symulację wytłaczania dwuślakowego przeciwbieżnego, chociaż powstał już pierwszy model komputerowy tego procesu [14].

Inne zagadnienia przetwórstwa tworzyw sztucznych modeluje się zwykle przy zastosowaniu systemów CFD [3-5], chociaż istnieją również programy specjalizowane [2].

Obok systemów komputerowego wspomagania obliczeń inżynierskich CAE pojawiają się również, bardzo nieliczne jeszcze, systemy z modułami optymalizacji procesów przetwórczych CAO (ang. Computer Aided Optimization), np. SUNDYXTRUD [5]. Ogólnie można jednak stwierdzić, że o ile stan wiedzy w zakresie modelowania procesów przetwórczych jest stosunkowo dobry, to zagadnienie optymalizacji tych procesów znajduje się ciągle na etapie prac badawczych.

2. Wielozadaniowy system modelowania procesów wytłaczania i wtryskiwania

Wytłaczanie i wtryskiwanie wykazują znaczne podobieństwo. W obydwu procesach uplastycznianie tworzywa i generowanie ciśnienia zachodzi w układach uplastyczniających, jednoślakowych lub dwuślakowych. Zasadnicza różnica między tymi procesami polega na tym, że ślimak w procesie wytłaczania wykonuje ruch obrotowy, natomiast w procesie wtryskiwania dodatkowo również ruch posuwisto-zwrotny. Te podobieństwa, przy świadomości różnic w mechanizmie transportu tworzywa, mechanizmie uplastyczniania

i przepływu tworzywa uplastycznionego, nasuwają koncepcję budowy wielozadaniowego, modułowego modelu komputerowego procesów wtryskiwania i wytłaczania, roboczo zwanego systemem MultiScrew. Taki system umożliwi symulację procesów wtryskiwania oraz wytłaczania jednoślیمakowego i dwuślیمakowego, współbieżnego i przeciwbieżnego. Te procesy mogą być realizowane przy zasilaniu z dozowaniem tworzywa lub zasilaniu bez dozowania. W świetle przedstawionego stanu wiedzy, budowa wielozadaniowego systemu modelowania wymaga przede wszystkim opracowania odpowiednich modeli wytłaczania przeciwbieżnego oraz wytłaczania jednoślیمakowego z dozowaniem.

Modułowa budowa systemu, jednolita koncepcja wprowadzania danych oraz jednolita koncepcja generacji, archiwizacji i wizualizacji wyników, stanowi o jego „przyjaznym” charakterze. Taki spójny koncepcyjnie system może być podstawą do rozwiązywania problemów optymalizacji procesów wytłaczania i wtryskiwania. W tym zakresie szczególnie interesującym rozwiązaniem jest metoda algorytmów genetycznych [15].

W Zakładzie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Politechniki Warszawskiej prowadzone są prace nad tego typu systemem, które jak dotąd zaowocowały budową dwóch elementów systemu, opisujących wytłaczanie jednoślیمakowe (program SSEM) oraz wytłaczanie dwuślیمakowe przeciwbieżne (program TSEM).

3. Podstawy fizyczne i algorytm obliczeń

Podstawę modelowania procesów ślimakowych stanowi analiza mechanizmu transportu i uplastyczniania tworzywa w tych procesach oraz opracowanie odpowiednich modeli matematycznych opisujących te zjawiska. Połączenie takich elementarnych modeli, przy zastosowaniu właściwych warunków brzegowych, prowadzi do kompleksowego modelu procesu, opisującego przepływ tworzywa w całym procesie przetwórczym.

Proces wytłaczania może być realizowany w dwojaki sposób: z zasilaniem bez dozowania (zwykle stosowanym przy wytłaczaniu jednoślیمakowym) lub z zasilaniem dozowanym (zwykle stosowanym przy wytłaczaniu dwuślیمakowym).

Zasilanie bez dozowania oznacza, że natężenie przepływu tworzywa nie jest znane i wynika ono ze współpracy układu wytłaczarka-głowica. Warunki tej współpracy określa tzw. punkt pracy wytłaczarki, który definiuje parametry procesu wytłaczania. Podstawę algorytmu obliczeń w tym przypadku stanowi rozwiązanie problemu wyznaczenia natężenia przepływu oraz rozkładu ciśnienia tworzywa w układzie uplastyczniającym i głowicy. Wielkości te są zależne od siebie, tak że nie jest możliwe obliczenie wartości jednej z nich bez znajomości drugiej. Problem ten można rozwiązać w drodze obliczeń iteracyjnych, w których jest badana zgodność przyrostu ciśnienia w układzie uplastyczniającym wytłaczarki ze spadkiem ciśnienia w głowicy wytłaczarskiej.

Zasilanie z dozowaniem oznacza, że znane jest natężenie przepływu tworzywa, ale równocześnie oznacza, że kanał ślimaka nie jest całkowicie wypełniony tworzywem. Takie całkowite wypełnienie musi mieć miejsce jedynie w końcowej części cylindra wytłaczarki, gdzie musi być już wytworzone ciśnienie niezbędne do wytłoczenia tworzywa przez głowicę (choć może występować również w innych miejscach ślimaka). Te spostrzeżenia stanowią podstawę algorytmu obliczeń w tej odmianie wytłaczania. Znając natężenie przepływu tworzywa oraz charakterystykę geometryczną głowicy, można określić spadek ciśnienia w głowicy wytłaczarskiej. To ciśnienie jest równe ciśnieniu u wylotu cylindra

wytłaczarki. Następnie, na podstawie charakterystyki przepływu tworzywa w układzie ślimakowym, można określić gradient ciśnienia w kanale ślimaka w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu tworzywa („do tyłu”, ang. „backward”). Gdy to ciśnienie zmniejsza się do zera, tworzywo przestaje wypełniać w całości kanał ślimaka. Na podstawie geometrii ślimaka można wówczas określić stopień wypełnienia kanału.

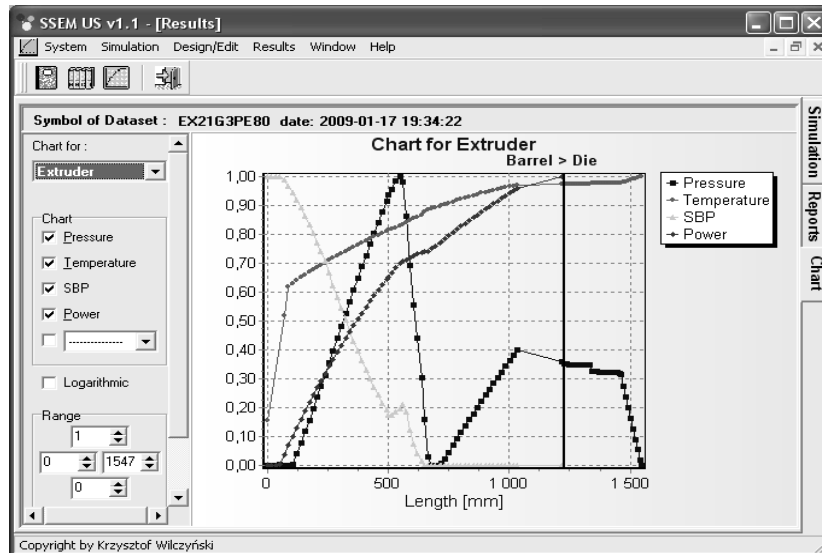
Ze względu na dużą złożoność i różnorodność zjawisk zachodzących w procesie wytłaczania, skomplikowaną geometrię przepływu, a także dużą czasochłonność obliczeń, znane modele komputerowe, jak dotąd, nie wykorzystują możliwości metody elementów skończonych MES. Stosowanie tej metody jest trudne i czasochłonne, i dlatego niechętnie wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Dlatego warta uwagi jest koncepcja zastosowania do całościowego modelowania procesów ślimakowych bezwymiarowych charakterystyk ślimaków [1], definiujących zależności natężenia przepływu i ciśnienia tworzywa. Takie zależności można zapisać w postaci związków regresyjnych, które można następnie implementować do całościowego modelu procesu. W rezultacie uzyskuje się rozwiązania, zapewniające dużą dokładność obliczeń (wynikającą ze stosowania numerycznych metod MES), przy rozsądnym czasie tych obliczeń i przystępnym (przyjaznym użytkownikowi) sposobie użytkowania.

3. Symulacja wytłaczania jednoślímakowego i dwuślímakowego

Podsumowując można stwierdzić, że symulacja procesów ślimakowych może być realizowana wg algorytmu postępującego („do przodu”, ang. „forward”) lub wg algorytmu wstecznego („do tyłu”, ang. „backward”). Pierwszy algorytm ma zastosowanie w przypadku procesów bez dozowania tworzywa, a drugi w przypadku procesów z dozowanym zasilaniem.

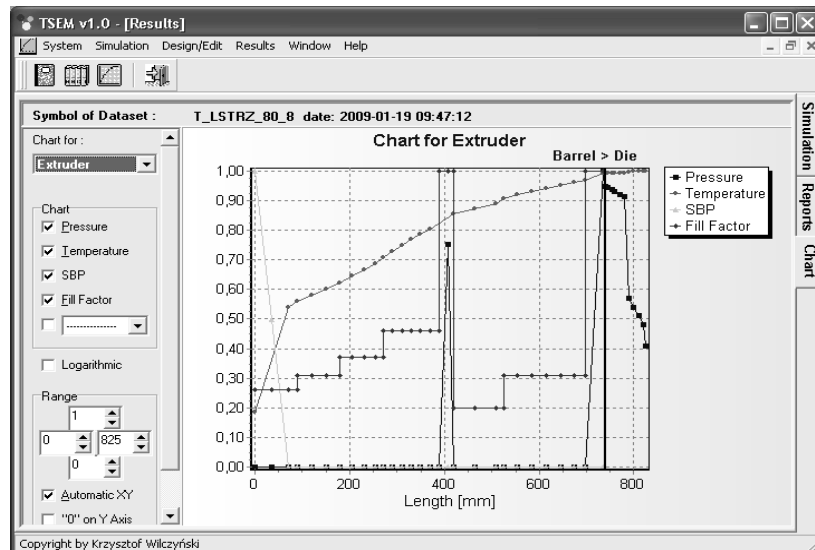
Przykładowe wyniki symulacji procesu wytłaczania jednoślímakowego na podstawie programu SSEM (działającego wg algorytmu postępującego) oraz wytłaczania dwuślímakowego przeciwbieżnego na podstawie programu TSEM (działającego wg algorytmu wstecznego) przedstawiono na rys. 2 i 3. W pierwszym przypadku jest podany przykładowo rozkład ciśnienia, temperatury i zużycia energii oraz przebieg uplastyczniania tworzywa. W drugim przypadku jest pokazany rozkład ciśnienia, temperatury i stopnia wypełnienia kanału ślimaka oraz przebieg uplastyczniania tworzywa.

Oczywiście, obydwie programy umożliwiają również prezentacją innych wyników obliczeń, charakteryzujących przebieg badanych procesów przetwórczych.



Rys. 2. Wyniki symulacji wytłaczania jednoślیمakowego (SSEM, wg algorytmu postępującego)

Fig. 2. SSEM simulation for single screw extrusion (forward algorithm)



Rys. 3. Wyniki symulacji wytłaczania dwuślیمakowego (TSEM, wg algorytmu wsteczny)

Fig. 3. TSEM simulation for counter-rotating twin screw extrusion (backward algorithm)

Literatura

- [1] Wilczyński K., *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2001.
- [2] Wilczyński K.: *Komputerowe modelowanie procesów przetwórstwa tworzyw sztucznych*, *Mechanik*, 80, 2006, 202.
- [3] www.fluent.com/software/polyflow.
- [4] www.polydynamics.com.
- [5] www.plamedia.co.jp.
- [6] www.moldflow.com.
- [7] www.simcon-worldwide.com.
- [8] www.moldex3d.com.
- [9] www.ktpweb.de.
- [10] Steller R., Iwko J., *Polymer Plastication during Injection Molding*, *International Polymer Processing*, 23, 2008, 252-263.
- [11] www.wip.pw.edu.pl/zpts.
- [12] www.temarex.com.
- [13] www.cemef.cma.fr.
- [14] Wilczyński K., Jiang Q., White J.L., *A Composite Model for Melting, Pressure, and Fill Factor Profiles in a Metered Fed Closely Intermeshing Counter-Rotating Twin Screw Extruder*, *International Polymer Processing*, 22, 2007, 198.
- [15] Nastaj A., *Badania optymalizacyjne procesu wytłaczania jednoślismakowego tworzyw sztucznych*, praca doktorska, Politechnika Warszawska 2005.