



Dariusz Kwiatkowski*, Jacek Nabiałek, Adam Gnatowski

Politechnika Częstochowska, Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją, al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa, Poland

* Corresponding author. E-mail: kwiatkowski@jpp.pcz.pl

Otrzymano (Received) 20.01.2010

ANALIZA NUMERYCZNA SKURCZU I ODKSZTAŁCENÍ PRÓBEK SENB WYKONANYCH PRZY ZMIENNYCH PARAMETRACH WTRYSKIWANIA

Przedstawiono obliczenia symulacyjne skurczu objętościowego i odkształceń próbek SENB dla PA6 i jego kompozytu z 25% zawartością włókna szklanego typu E. Symulację procesu wtryskiwania przeprowadzono za pomocą specjalistycznego programu MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT ver. 4.1, zaś przestrzenny model wypraski został wykonany w module Master Modeler Pakietu I-DEAS NX. Do symulacji komputerowych zastosowano model reologiczny Crossa. Do symulacji fazy docisku oraz w celu określenia skurczu objętościowego i odkształcenia próbek SENB jest niezbędna znajomość zależności p - v - T . W obliczeniach numerycznych wykorzystano równanie Taita. Krzywe p - v - T otrzymano z badań wykonanych w ramach grantu własnego. Przeprowadzenie symulacji procesu wtryskiwania wymaga wprowadzenia do programu obliczeniowego danych dotyczących parametrów geometrycznych wypraski, właściwości przetwarzanego tworzywa, warunków wtryskiwania oraz danych odnoszących się do wtryskarki. Badania symulacyjne przeprowadzono, opierając się na sporządzonym programie badań. Program ten został opracowany z wykorzystaniem pakietu Statistica 6.0. Uwzględniono w nim zmienność następujących czterech warunków procesu wtryskiwania: ciśnienia docisku, temperatury wtryskiwania, prędkości wtryskiwania oraz temperatury formy. Symulacje przeprowadzono dla skrajnych parametrów procesu wtryskiwania od układu 9 do układu 17. W wyniku przeprowadzonych symulacji komputerowych otrzymano obszerny materiał badawczy, który poddano szczegółowej analizie w celu właściwej jego interpretacji. Z konieczności przedstawiono tylko wybrane wyniki badań symulacyjnych procesu wtryskiwania w postaci graficznej.

Słowa kluczowe: proces wtryskiwania, kompozyty polimerowe, obliczenia symulacyjne, skurcz objętościowy, odkształcenia przetwórcze, poliamid 6

NUMERICAL ANALYSIS OF SHRINKAGE AND DEFORMATION OF THE SAMPLES SENB PRODUCED WITH DIFFERENT PARAMETERS OF INJECTION MOLDING

Simulated calculations of volumetric shrinkage and deformation of samples SENB for PA6 and its composite with percentage of 25% of glass fiber type E were presented in this development. Simulation of injection process was carried out with help of specialist computer program MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT version 4.1, but the three-dimensional model of moulded piece was made in the module MASTER Modeler from software package of computer program I-DEAS NX. For computer simulation the rheological model of Cross was used. For simulation of pressure phase and for defining of volumetric shrinkage and deformation of samples SENB knowledge of dependence p - v - T . In numerical calculations the equations of Tait was used. Curves of p - v - T were obtained from experimental researches made in a frame of own ground. Carrying out of simulation of injection process require data input concerning geometrical parameters of moulded piece, properties of processed plastic, conditions of injection process and data referring to injection machine into calculating program. Simulating researches were carried out on a base of made up the program of researches. The program was developed using the software package Statistica 6.0. Variation of the four conditions of injection process: pressure, pressing down, temperature of injection, speed of injection and mould temperature, was taken into consideration. The simulation was carried out for extreme parameters of injection process from arrangement 9 up to arrangement 17. In result of carried out computer simulations, extensive research material was obtained, which was subjected into detailed analysis in order to its adequate interpretation. It was necessary to present only selected results of simulating researches of injection process in graphical form.

Keywords: injection molding process, polymer composites, simulation calculation, volumetric shrinkage, warpage, polyamide 6

WSTĘP

Obecnie programy do symulacji procesu wtryskiwania są powszechnie stosowanym narzędziem wykorzy-

stywanym w przemyśle oraz stanowią temat licznych prac badawczych. Coraz więcej firm jest przekonanych

o konieczności stosowania symulacji do analizy procesu wtryskiwania ze względu na aspekty ekonomiczne oraz jakościowe [1-4].

W ostatnich latach powstało wiele programów do komputerowej symulacji procesów wtryskiwania. Najczęściej są stosowane programy MOLDFLOW i CADMOULD. Programy te wykorzystują metodę elementów skończonych MES. Komputerową symulację procesu wtryskiwania rozpoczyna się od analizy fazy wypełnienia formy i optymalizacji położenia kanału wlewowego. Celem tego działania jest poprawne obliczenie położenia linii łączenia, wyeliminowanie pęcherzy powietrza, zapewnienie równomiernego spadku ciśnienia i optymalizacja położenia włókien. Następnym krokiem jest optymalizacja takich parametrów procesu wtryskiwania, jak profilowanie strumienia objętości, temperatury formy, wielkości i czasu fazy docisku. Obliczenia skurczu i odkształceń stanowią podstawę do prognozowania tendencji wypraski do deformacji w zależności od właściwości tworzywa, parametrów procesu, położenia wlewka i warunków cieplnych w formie [1-4].

Od użytkowników programów do symulacji procesu wtryskiwania wymagana jest wiedza z zakresu znajomości systemów CAD, technologii procesu wtryskiwania oraz podstaw teoretycznych przepływu tworzywa polimerowego w formach wtryskowych.

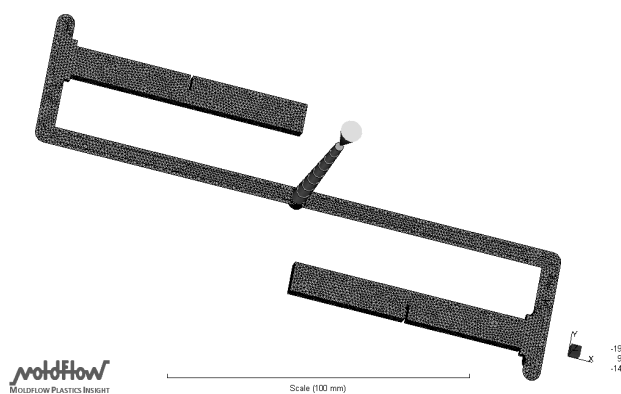
Komputerowe programy symulacyjne umożliwiają przeprowadzenie rzetelnych obliczeń numerycznych pod warunkiem, iż dysponuje się kompletem wyników badań właściwości przetwarzanego tworzywa bądź jego kompozytu. Programy komputerowe służące do symulacji procesu wtryskiwania pomimo złożonego modelu matematycznego nie są w stanie uwzględnić wszystkich czynników oraz zakłóceń występujących w rzeczywistym procesie. Dlatego stosuje się szereg uproszczeń po to, aby model matematyczny, na podstawie którego opracowywany jest model obliczeniowy, nie był zbyt skomplikowany. Każde uproszczenie wprowadza jednak do obliczeń błąd, a jego wartość zależy od stopnia zastosowanych uproszczeń [4, 5].

Badania procesu wtryskiwania oparte na symulacji komputerowej mogą być traktowane jako rozpoznawcze i pomocnicze.

PODSTAWY I ZAŁOŻENIA

Symulację procesu wtryskiwania PA6 i jego kompozytów z włóknem szklanym przeprowadzono za pomocą specjalistycznego programu MOLDFLOW PLASTICS INSIGHT ver. 4.1, zaś przestrzenny model wypraski został wykonany w module Master Modeler Pakietu I-DEAS NX. Podstawowymi równaniami, jakie należy rozwiązać, są równania zachowania masy, zachowania ruchu oraz równanie zachowania energii. Równania te w postaci ogólnej nie są możliwe do rozwiązania dla procesów tak złożonych, jak: wtryskiwanie, dlatego też należy poczynić szereg założeń upraszczających.

Założenia te dotyczą zarówno właściwości polimeru, jak i kształtu obszaru, w którym równania są stosowane [5, 6]. Ważnym założeniem upraszczającym jest wprowadzenie definicji temperatury ustania przepływu (ang. *no-flow temperature*). Jest to temperatura, przy której tworzywo polimerowe można traktować jako ciało stałe. Przy założeniu temperatury ustania przepływu składowe prędkości tworzywa polimerowego zestalonego przy ściankach gniazda przyjmuje się równe zero. Ponadto zakłada się, że przepływ polimeru jest symetryczny względem powierzchni środkowej gniazda formującego. Oprócz równań podstawowych niezbędne do przeprowadzenia komputerowej symulacji procesu wtryskiwania jest przyjęcie odpowiedniego reologicznego równania stanu polimeru, określającego zależność pomiędzy lepkością polimeru a szybkością ścinania. Do badań przyjęto siedmioparametrowy model reologiczny Crossa - WLF. Do symulacji fazy docisku oraz w celu określenia skurczu objętościowego i odkształcenia wyprasek jest niezbędna znajomość zależności $p-v-T$. W obliczeniach numerycznych wykorzystano równanie Taita, które przedstawia zmianę objętości właściwej w funkcji temperatury. Krzywe $p-v-T$ otrzymano z badań wykonanych w Katedrze Procesów Polimerowych Politechniki Lubelskiej. Przeprowadzenie symulacji procesu wtryskiwania wymaga wprowadzenia do programu obliczeniowego danych dotyczących parametrów geometrycznych wypraski, właściwości reologicznych tworzywa polimerowego, warunków wtryskiwania oraz danych odnoszących się do wtryskarki. Pierwszym etapem symulacji było zbudowanie modelu bryłowego wypraski, które przeprowadzono za pomocą modułu Master Modeler Pakietu I-DEAS NX. Tak zbudowany model obejmuje próbkę pomiarową do badań odporności na pęknięcie typu SENB i układ wlewowy (kanał centralny, kanały doprowadzające i przewężki) (rys. 1).



Rys. 1. Model MES wypraski wraz z układem wlewowym

Fig. 1. FEM model with gating

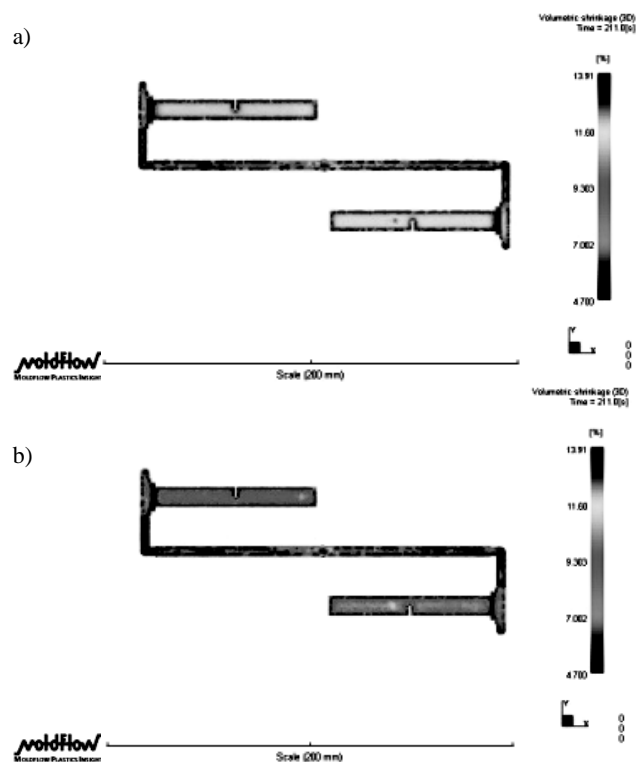
Model ten zapisano w formacie STL, co umożliwiło import do programu symulacyjnego MOLDFLOW. Następnie wprowadzono do programu warunki chłodzenia wypraski (kształt i położenie kanałów chłodzących oraz właściwości czynnika chłodzącego, którym

była woda). Kolejnym krokiem było modelowanie kształtu geometrycznego formy wtryskowej i rozpięcie na nią stosownej siatki MES. Model ten uwzględniał dwugniazdową konstrukcję formy wtryskowej. W programie tym wygenerowano stosowną siatkę MES typu 3D dla wyprasek, przewężek szczelinowych i kanału doprowadzającego złożoną z 86 966 elementów tetrahedralnych. Do zamodelowania kanału centralnego doprowadzającego tworzywo polimerowe z dyszy wtryskowej do gniazda formującego użyto 8 jednowymiarowych elementów 1D. Układ chłodzenia zamodelowano z użyciem 66 jednowymiarowych elementów. Kluczowym momentem w badaniach symulacyjnych było wprowadzenie do symulatora danych opisujących właściwości przetwarzanego tworzywa. Dane te obejmowały właściwości cieplne, reologiczne i mechaniczne wtryskiwanego PA6 i jego kompozytu z 25% zawartością włókna szklanego typ E. Kolejnym krokiem było wprowadzenie do programu symulacyjnego (Moldflow Plastisc Insight ver. 4.1) warunków procesu wtryskiwania. Badania symulacyjne przeprowadzono, opierając się na sporządzonym programie badań. Program ten został opracowany z wykorzystaniem pakietu Statistica 6.0. Uwzględniono w nim zmienność następujących czterech warunków procesu wtryskiwania: ciśnienia docisku, temperatury wtryskiwania, prędkości wtryskiwania oraz temperatury formy. Symulacje przeprowadzono dla skrajnych parametrów procesu wtryskiwania od układu 9 do układu 17 [7]. Z bazy danych w programie MOLDFLOW wybrano wtryskarke KM 65/160/C4 firmy Krauss Maffei, którą stosowano w badaniach.

WYNIKI SYMULACJI

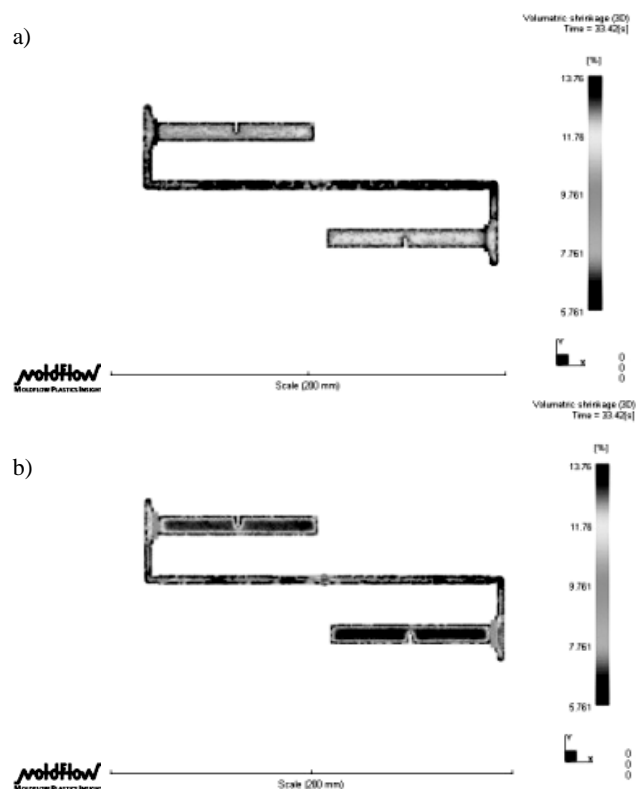
Skurcz objętościowy wypraski uzależniony jest od tych parametrów wtryskiwania, które mają wpływ na upakowanie tworzywa oraz na jego krystalizację. Do najważniejszych z nich zaliczamy: temperaturę formy i ciśnienie docisku. Ciśnienie docisku wypycha więcej tworzywa polimerowego do gniazda w celu zrekomensowania redukcji objętości polimeru mającej miejsce przy jego krystalizacji [1-3, 8-10]. Faza ta ma istotne znaczenie dla stabilności wymiarowej, ponieważ pomaga ona utrzymać jednorodny i stopniowy proces krystalizacji. Na rysunku 2 przedstawiono skurcz objętościowy wypraski z PA6 uzyskanej przy ciśnieniu docisku 50 i 100 MPa. Zmiana ciśnienia docisku z 50 na 100 MPa powoduje zmniejszenie się maksymalnej wartości skurczu objętościowego o 1,26%. Jeżeli wartość ciśnienia docisku jest niższa, wówczas do gniazda formującego zostanie upakowana mniejsza ilość tworzywa i w konsekwencji powstanie większy skurcz. Chcąc ograniczyć skurcz wypraski z PA6, stosuje się możliwie najwyższe ciśnienie docisku. Należy zwrócić uwagę, że ciśnienie docisku powinno być stałe w ciągu całego czasu upakowywania (czas docisku), ponieważ każde wahania ciśnienia powodują nierównomierną krystalizację, prowadzącą do pogorszenia własności mechanicznych. W niniejszych symulacjach optymalny

czas docisku ustawiono zgodnie z danymi literaturowymi i danymi producentów.



Rys. 2. Rozkład skurczu objętościowego dla wypraski z PA6 uzyskanej przy różnych ciśnieniach docisku: a) 50 MPa, b) 100 MPa

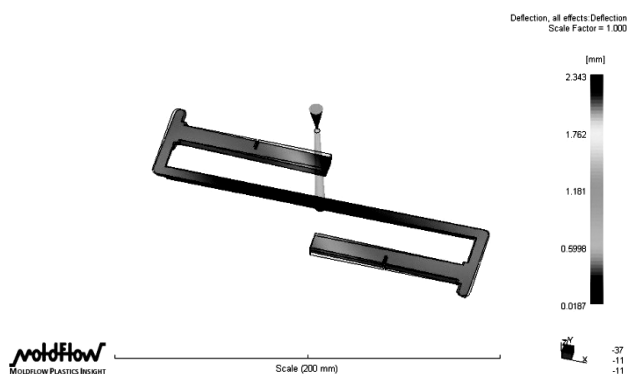
Fig. 2. Distribution of volumetric shrinkage of molded piece of PA6 obtained at different pressure: a) 50 MPa, b) 100 MPa



Rys. 3. Rozkład skurczu objętościowego dla wypraski z PA6 uzyskanej przy różnych temperaturach formy: a) 50°C, b) 90°C

Fig. 3. Distribution of volumetric shrinkage of molded piece of PA6 obtained at different mould temperatures: a) 50°C, b) 90°C

Na stopień krystalizacji, a przez to na wielkość skurczu objętościowego wpływa szybkość chłodzenia. Czynniki decydujące o szybkości chłodzenia to przede wszystkim grubość ścianek wypraski i temperatura formy. Temperatura formy oddziałuje na skurcz objętościowy poprzez wpływ na szybkość chłodzenia oraz temperaturę krystalizacji ciekłego tworzywa polimerowego [1-3, 8-10]. Wpływ temperatury formy na skurcz objętościowy PA6 został przedstawiony na rysunku 3. Zmiana temperatury formy o 40°C powoduje zmianę skurczu objętościowego o 1,41%. Jeżeli temperatura formy jest wysoka, PA6 krystalizuje powoli. W takich warunkach mamy do czynienia z dużym skurczem pierwotnym wypraski, ale z uwagi na fakt, że krystalizacja jest pełniejsza, można oczekiwać mniejszego skurczu wtórnego, a więc lepszej długoterminowej stabilności wymiarowej wtryskiwanych wyprasek. Z drugiej strony niższa temperatura formy powoduje szybsze chłodzenie PA6. Daje to w rezultacie mniejszy skurcz pierwotny. Jednak po dłuższym okresie należy spodziewać się większych zmian wymiarów wyprasek z PA6 prowadzących do narastania naprężeń wewnętrznych (większy skurcz wtórny). Skurcz wtórny jest spowodowany tym, że temperatura zeszklenia tworzywa jest znacznie niższa od temperatury pokojowej. Kompozyty PA6 z włóknem szklanym charakteryzują się mniejszym skurczem objętościowym niż jego osnowa. Różnica między skurczem objętościowym wyprasek uzyskiwanych przy tych samych parametrach wtryskiwania wyniosła 4,66%. Ważnym czynnikiem powodującym deformację wyprasek z kompozytów PA6 z napełniaczem włóknistym w postaci włókna szklanego ciętego jest symetria wypraski (rys. 4). Przyczyną deformacji tych wyprasek jest asymetryczne położenie karbu prostokątnego znajdującego się w środkowej części próbki SENB. Tak umiejscowiony karb zakłóca przepływ tworzywa polimerowego, a orientacja włókien powoduje deformację wypraski. Główną przyczyną zjawiska deformacji w tych wypraskach jest też różnica w ukierunkowaniu włókien wzdłuż i w poprzek do kierunku przepływu. Skurcz w kierunku przepływu jest o około 50% większy niż w kierunku prostopadłym do przepływu.



Rys. 4. Odształcenia wypraski wykonanej z kompozytu PA6 z włóknem szklanym

Fig. 4. Strain of moulded piece of PA6 composite with 25% glass fiber

WNIOSKI

Na deformacje wyprasek można wpłynąć przez zastosowanie odpowiedniego ciśnienia docisku i temperatury formy pod warunkiem, że wypraska, punkt wtrysku, konstrukcja formy zostały właściwie zaprojektowane. PA6 i kompozyt PA6 wzmocniony włóknem szklanym mogą być wtryskiwane do form o temperaturze od 50 do 90°C, jednakże najmniejsze wartości skurczu zanotowano dla wyprasek uzyskanych przy wysokich temperaturach formy. Wypraski wtrysnięte w wyższej temperaturze formy będą charakteryzować się niskim skurczem wtórnym, co gwarantuje dobrą stabilność wymiarową. Natomiast wypraski wtrysnięte do form o niskiej temperaturze będą wykazywać większy skurcz wtórny z uwagi na fakt, że szybkie schłodzenie tworzywa pozostawia go w niestabilnym stanie krystalizacji, a to powoduje znaczną rekrytalizację. Jeżeli później takie wypraski będą pracować w wysokiej temperaturze, następująca rekrytalizacja spowoduje znaczny i szybki skurcz wtórny. Wysokie temperatury form wymagają zastosowania termostatów olejowych lub wodnych ciśnieniowych. Codzienną praktyką stało się stosowanie wielu obwodów regulacji temperatury mających na celu optymalizację odbioru ciepła. Temperatura formy musi być tak regulowana, aby zapewnione było równomierne odprowadzanie ciepła ze wszystkich fragmentów wypraski.

Faza docisku ma istotne znaczenie dla stabilności wymiarowej, ponieważ pomaga ona utrzymać jednolity i stopniowy proces krystalizacji. Zmiana ciśnienia o 50 MPa powoduje zmianę skurczu objętościowego o 1,26%. W celu uzyskania wyprasek mających dobre właściwości mechaniczne, stabilne wymiarowo i pozbawione odkształceń, należy wytworzyć odpowiednie ciśnienie docisku oraz, co jest bardzo istotne, utrzymać je przez odpowiednio długi czas, dzięki czemu możliwa będzie szybka krystalizacja przy stałym ciśnieniu.

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na deformację wyprasek z PA6 z włóknem szklanym jest symetria wypraski. Innymi przyczynami zmian wymiarowych wypraski wywarzonej z PA6 mogą być zmiany temperatury lub warunków otoczenia.

LITERATURA

- [1] Sikora R., Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, Wyd. Edukacyjne, Warszawa 1993, 528.
- [2] Smorawiński A., Technologia wtrysku, WNT, Warszawa 1989.
- [3] Nowoczesne formy wtryskowe, Problemy konstrukcji i użytkowania, praca zbiorowa pod red. H. Zawistowskiego, PLASTECH, Warszawa 2001.
- [4] Kwiatkowski D., Nabiałek J., Komputerowe symulacje procesu wtryskiwania kompozytów tworzyw sztucznych, Kompozyty (Composites) 2005, 5, 4, 93-95.
- [5] Kowalska B., Skurcz wtryskowy a zależność pVT, Polimery 2007, 52, 4, 280-285.

- [6] Bociąga E., Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność, Seria Monografie nr 82, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- [7] Kwiatkowski D., Wpływ wybranych warunków wtryskiwania na odporność na pękanie kompozytu polipropylenu z talkiem, Polimery 2009, 54, 3, 221-226.
- [8] Bociąga E., Wpływ temperatury formy wtryskowej i prędkości wtryskiwania na wybrane właściwości wyprasek polietylenowych, Polimery 2000, 45, 11-12, 833-839.
- [9] Bociąga E., Wpływ sposobu doprowadzania tworzywa do gniazda formy wtryskowej na strukturę i stopień krystaliczności próbek polietylenu dużej gęstości (PE-HD), Polimery 2001, 46, 9, 638-641.
- [10] Postawa P., Skurcz przetwórczy wyprasek a warunki wtryskiwania, Polimery 2005, 50, 3, 201-207.