

Karolina GŁOGOWSKA, Janusz W. SIKORA\*

Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych  
e-mail: janusz.sikora@pollub.pl

## Właściwości lepkosprężyste polietylenu małej gęstości oznaczane podczas ściskania

**Streszczenie:** Statyczna próba ściskania, obok statycznej próby rozciągania jest jedną z podstawowych prób stosowanych do określenia właściwości mechanicznych materiałów. Właściwości wytrzymałościowe tworzyw termoplastycznych zależą od wielu czynników: sił wiązań chemicznych, sił oddziaływań międzycząsteczkowych, prędkości obciążania, czasu działania obciążenia, właściwości lepkosprężystych itp. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie są szczególnie ważne podczas doboru tworzywa na elementy konstrukcyjne maszyn i do zastosowań w budownictwie, gdzie współpracują one z materiałami o odmiennych często właściwościach. W pracy przedstawiono wyniki badań powrotu poodkształceniowego po ściskaniu próbek z polietylenu małej gęstości (PE-LD) otrzymanych w procesie wytłaczania konwencjonalnego i autotermicznego przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów podstawowych wielkości występujących podczas próby ściskania tworzyw termoplastycznych tj. bezwzględne skrócenie próbki ( $\Delta L$ ); natychmiastowy powrót poodkształceniowy ( $\sigma$ ); opóźniony powrót poodkształceniowy ( $\chi$ ) oraz odkształcenie ściskające ( $\epsilon$ ). Zaprezentowano zależność zmiany długości odcinka pomiarowego ( $h_2$ ) kształtki od czasu po usunięciu z maszyny wytrzymałościowej. Artykuł zakończono stosownymi wnioskami.

Słowa klucze: ściskanie, wytłaczanie, polietylen małej gęstości, natychmiastowy powrót poodkształceniowy

### THE VISCOELASTIC PROPERTIES OF LOW DENSITY POLYETHYLENE DETERMINED DURING COMPRESSION

The static compression test, in addition to the static tensile test, is one of the basic tests used to determine the mechanical properties of materials. The strength properties of thermoplastics depend on many factors: chemical bonding forces, intermolecular forces, the speed of loading, the time of loading effect, viscoelastic properties, etc. The results of the compressive strength are especially important for the selection of materials for construction elements of machines and for the use in construction industry, where they cooperate with materials which often have different properties. The work presents the results of testing elastic recovery during the compression of samples from low-density polyethylene (PE-LD), obtained in the conventional and autothermal extrusion process and with different rotational speeds of the screw. The work presents the results of basic measurements of parameters occurring during the compression test of thermoplastics, i.e. free absolute strain ( $\Delta L$ ); immediate elastic recovery ( $\sigma$ ); delayed elastic recovery ( $\chi$ ) and complete elastic recovery ( $\epsilon$ ). The dependence of change in the length of the measuring section ( $h_2$ ) of the moulder from the time after removal from the testing machine was presented. The paper was concluded with appropriate conclusions.

Keywords: compression, extrusion, low-density polyethylene, immediate elastic recovery

### 1. WSTĘP

Wyniki badań wytrzymałości podczas ściskania, jak również powrotu poodkształceniowego, są wykorzystywane do charakteryzowania tworzyw polimerowych wtedy, gdy dane tworzywo ma być eksploatowane jako materiał przenoszący naprężenia ściskające o określonej wartości liczbowej [1-4]. Obecnie sytuacja taka występuje coraz częściej, szczególnie przy budowie maszyn i w budownictwie.

Sprężystość i granica sprężystości są właściwościami tworzyw mającymi podstawowe znaczenie przy projektowaniu przedmiotów poddawanych wielokrotnym odkształceniom sprężystym i wykorzystywanymi w zamknięciach zatraskowych, różnego rodzaju pojemnikach, przedmiotach gospodarstwa domowego, przyrządach sportowych itp. Wszędzie tam, w miejsce dotychczasowych rozwiązań łączących elementy np. gwintowych, projektuje się konstrukcje, w których odkształcenie sprę-

żyste decyduje o skuteczności zamknięcia [5]. Sprężystość jest miarą zdolności materiału do natychmiastowego powrotu poodkształceniowego [6-9], które jest spowodowane właściwościami lepkosprężystymi materiałów polimerowych [4, 5]. Właściwości lepkie są związane z występowaniem odkształceń nieodwracalnych, których stopień – pod działaniem określonej siły – ciągle zwiększa się z upływem czasu. Natomiast, właściwości sprężyste są związane z występowaniem odkształceń sprężystych (odwracalnych), zanikających samorzutnie, natychmiast po ustaniu działania siły, która je wywołuje. W celu opisanie właściwości reologicznych tworzyw wprowadzono modele mechaniczne odzwierciedlające zachowanie się tworzyw w określonych warunkach obciążenia i odkształcenia [10, 11]. Podstawowe znaczenie mają modele ciał doskonałych, których właściwości reologiczne są dokładnie zdefiniowane. Reprezentują one podstawowe rodzaje odkształcenia tworzyw: odkształcenie sprężyste (odwracalne), odkształcenie plastyczne (nieodwracalne),

odkształcenie podczas przepływu (nieodwracalne) [12÷14]. Modele mechaniczne ciał o złożonych właściwościach reologicznych uzyskuje się przez odpowiednie połączenie trzech modeli ciał doskonałych. Takie modele mogą się różnić rodzajem i liczbą elementów użytych do ich budowy oraz sposobem połączenia ich między sobą. Wyróżnia się następujące modele mechaniczne ciał lepkosprężystych: model Maxwella, model Kelvina-Voigta, model Burgersa oraz model Binghama [8, 15].

Celem omówionych w niniejszym artykule badań doświadczalnych było określenie wybranych właściwości lepkosprężystych podczas powrotu poodkształceniowego ściskanych próbek w postaci prętów otrzymanych z polietylenu małej gęstości (PE-LD) w procesie wytłaczania konwencjonalnego i autotermicznego przy różnej prędkości obrotowej ślimaka.

## 2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

### 2.1 Stanowisko badawcze

Do otrzymania próbek wykorzystano dwie linie technologiczne do wytłaczania, każda z nich składała się między innymi z wytłaczarki konwencjonalnej T32 (rys. 1) o stosunku długości części roboczej ślimaka do jego średnicy wynoszącym 25 lub wytłaczarki autotermicznej W-25D (rys. 2) o stosunku  $L/D = 23$ . Układy uplastyczniające wytłaczarek zakończone zostały wzdłużną głowicą



Rys. 1. Wygląd ogólny linii technologicznej wytłaczania konwencjonalnego T32-25: 1 – zasobnik tworzywa, 2 – układ uplastyczniający, wygląd obudowy, 3 – głowica wytłaczarska, 4 – silnik napędowy, 5 – obudowa przekładni redukcyjnych, 6 – wentylatory chłodzące, 7 – szafa sterownicza, 8 – urządzenie ochładzające

wytłaczarską do prętów. Dysza głowicy wytłaczarskiej miała średnicę 9 mm. Za głowicą znajdowała się wanna chłodząca o długości 2 metrów, w której przepływała woda o temperaturze 16 °C. Kolejnym elementem składowym linii technologicznej był odciąg o bezstopniowej nastawie prędkości odbioru wyłoczonego w zakresie od 0 do 3,45 m/min.

W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę techniczną zastosowanych wytłaczarek, według danych producenta.



Rys. 2. Wygląd ogólny wytłaczarki W-25D wraz z głowicą wytłaczarską i urządzeniem ochładzającym (wanną chłodzącą): 1 – zasobnik tworzywa, 2 – układ uplastyczniający, 3 – głowica wytłaczarska, 4 – silnik napędowy, 5 – wanna chłodząca, 6 – czujniki pomiaru ciśnienia i temperatury tworzywa

Tab. 1. Dane techniczne wytłaczarek: T32 i W-25D

Wielkość charakterystyczna	Wytłaczarka konwencjonalna T32	Wytłaczarka autotermiczna W-25D
Średnica ślimaka $D$ , mm	32	25
Długość ślimaka $L$ , mm	800	575
Liczba obrotów ślimaka, $s^{-1}$	1,08 ÷ 5,35	
Liczba stref grzejnych	4	3
Moc grzejników, kW	4	5,7
Moc silnika wytłaczarki, kW	5,5	3,57
Liczba obrotów silnika, $s^{-1}$	0 ÷ 33	10 ÷ 49,5
Liczba stref grzejnych głowicy wytłaczarskiej	1	1
Masowe natężenie przepływu tworzywa, kg/h	3 ÷ 21	do 22

Próbie statycznego ściskania przeprowadzono z wykorzystaniem standardowej maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z010 zgodnie z procedurą opisaną w normie [10].

### 2.2 Materiał

Tworzywem wytłaczanym był polietylen małej gęstości PE-LD o nazwie handlowej Malen E, oznaczony symbolem FABS 23-D022 wg PN-89/C-89286/16.

Podstawowe właściwości tworzywa stosowanego w badaniach to:

- gęstość normalna w temperaturze 23 °C, 919÷923 kg/m<sup>3</sup>;
- masowy wskaźnik szybkości płynięcia (190 °C; 2,16kg), 1,6 ÷ 2,5g/10 min;
- moduł sztywności przy rozciąganiu, 250 MPa;
- granica plastyczności przy rozciąganiu, 10 MPa;
- wytrzymałość na rozciąganie w kierunku wzdłużnym, 18 MPa;

- wytrzymałość na rozciąganie w kierunku poprzecznym, 17 MPa;
- wydłużenie przy zerwaniu w kierunku wzdłużnym, 450 %;
- wydłużenie przy zerwaniu w kierunku poprzecznym, 540 %;
- twardość Shore'a, 48 °ShD;
- temperatura mięknienia wg Vicata, (50°C/h 10N), 90°C;
- temperatura topnienia, 112°C.

Próbki do badań miały postać walca o średnicy 10 mm i długości 40 mm.

### 2.3 Czynniki badawcze

Na potrzeby przeprowadzanych badań podczas wytłaczania, a następnie ściskania polietylenu małej gęstości opracowano zbiór ważniejszych czynników charakteryzujących proces badawczy. W badaniach przyjęto ważniejsze następujące czynniki badawcze:

Czynniki wynikowe:

- bezwzględne skrócenie próbki  $\Delta L$ , mm;
- natychmiastowy powrót poodkształceniowy  $\sigma$ ; mm;
- opóźniony powrót poodkształceniowy  $\chi$ ; mm;
- odkształcenie ściskające  $\varepsilon$ , mm;
- wysokość próbki po czasie  $t$  usunięcia z maszyny wytrzymałościowej,  $h_2$ , mm.

Czynniki zmienne:

- prędkość obrotowa ślimaka dla wytłaczarki konwencjonalnej i autotermicznej  $v$ : 4.0; 4.22; 4.38; 4.58 i 4.77 s<sup>-1</sup>;
- czas po wyjęciu próbek z maszyny wytrzymałościowej  $t$ : 0, 0,5; 1,5; 2,5; 7,5; 19,5; 43,5; 67,5; 91,5 i 1000 h.

Czynniki stałe:

- elementy geometryczne ślimaka, cylindra, głowicy wytaczarskiej, urządzeń uzupełniających;
- temperatura w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i głowicy wytaczarskiej;
- temperatura wody chłodzącej w wannie.

Czynniki zakłócające:

- napięcie prądu elektrycznego: 219 – 241 V,
- wilgotność względna powietrza: 55 – 65 %,
- temperatura otoczenia: 20 – 24 °C.

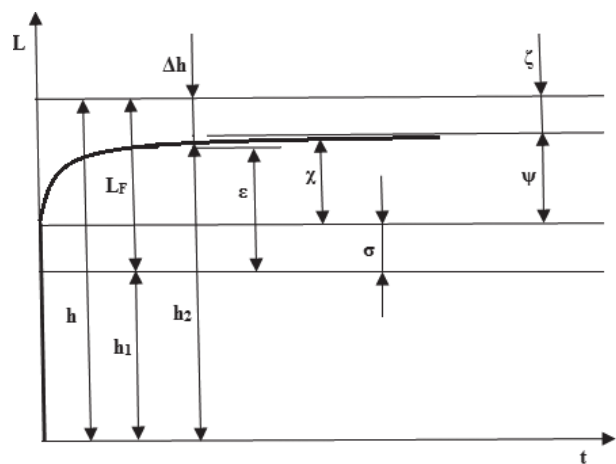
Na podstawie przebiegu procesu wytłaczania przyjęto, że wpływ czynników zakłócających był mały i nie wpłynęły one na proces, jak również na wykonanie próbek do badań.

### 2.4 Metodyka badań

W procesie wytłaczania konwencjonalnego i autotermicznego przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka: 4.0; 4.22; 4.38; 4.58 i 4.77 s<sup>-1</sup> uzyskano pręty o średnicy, wskutek występowania efektu Barusa, większej niż średnica dyszy i nierównomiernej, zmieniającej się w granicach od 10,1 do 10,6 mm. Odcinki prętów poddano obróbce mechanicznej – skrawaniu, celem uzyskania stałej średnicy, następnie odcinki prętów były cięte na określoną w badaniu długość. Próbę statycznego ściskania z uży-

ciem maszyny wytrzymałościowej przeprowadzono zgodnie z normą ISO 604:2006 [15]. Próbki walcowe ścismano wzdłuż ich osi ze stałą prędkością 5 mm/min, aż do osiągnięcia założonego stopnia odkształcenia – 50% wysokości próbki. Podstawy próbek były prostopadłe do kierunku przyłożenia siły i równoległe względem siebie. Po wyjęciu próbek z maszyny testującej, zmierzono wysokość próbek ( $h_2$ ) po upływie: 0 (moment, w którym próbka została wyjęta z urządzenia); 0,5; 1,5; 2,5; 7,5; 19,5; 43,5; 67,5; 91,5 i 1000 godzin.

Na potrzeby badań, określono: bezwzględne skrócenie próbki ( $\Delta L$ ); natychmiastowy powrót poodkształceniowy ( $\sigma$ ); opóźniony powrót poodkształceniowy ( $\chi$ ) oraz odkształcenie ściskające ( $\varepsilon$ ). Na rysunku 3 zaprezen-



Rys. 3. Model zmiany wymiaru próbki od czasu po zaprzestaniu wywierania siły ściskającej na badany materiał wraz z charakterystycznymi parametrami:  $h$  – wysokość próbki przed próbą ściskania;  $L_F = h_1$  – wysokość próbki po ścisnaniu ( $1/2h$ );  $h_2$  – wysokość próbki po usunięciu z maszyny wytrzymałościowej;  $\Delta h$  – bezwzględne skrócenie próbki;  $\varepsilon$  – odkształcenie ściskające;  $\sigma$  – natychmiastowy powrót poodkształceniowy;  $\chi$  – opóźniony powrót poodkształceniowy;  $\zeta$  – trwałe odkształcenie;  $\psi$  – całkowity opóźniony powrót poodkształceniowy

towano graficzny model zmianę wymiarów próbki od czasu po zaprzestaniu wywierania siły ściskającej na badane tworzywo, z którego można oznaczyć związki pomiędzy badanymi wielkościami. Niezbędne wielkości obliczano z następujących zależności:

$$\Delta h = h - h_2 \quad (1)$$

$$\varepsilon = \sigma + \chi \quad (2)$$

$$h_1 = L_F = 1/2h = \Delta h + \varepsilon = \Delta h + \sigma + \chi \quad (3)$$

$$L_F = \sigma + \psi + \zeta \quad (4)$$

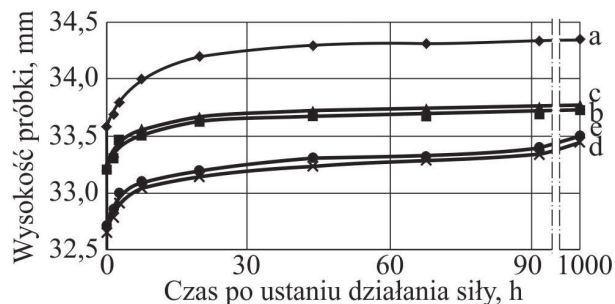
Wielkości występujące w zależnościach (1), (2), (3) oraz (4) zostały opisane w podpisie pod rysunkiem 3.

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

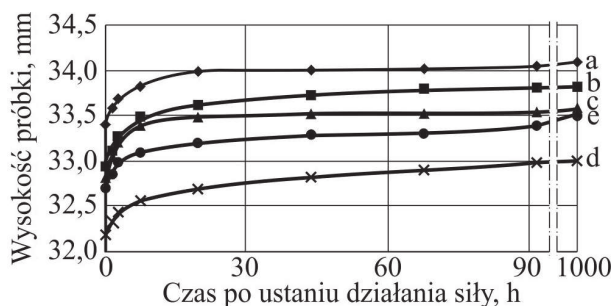
Na podstawie pomiarów otrzymanych podczas badań sporządzono stosowne wykresy zależności określających przebieg zmian wysokości próbek po wyjęciu z



maszyny wytrzymałościowej, otrzymanych w procesie wytłaczania konwencjonalnego i autotermicznego od czasu (rys. 4 oraz rys. 5).



Rys. 4. Przebieg zmian wysokości  $h_2$  próbek po ustaniu działania siły, otrzymanych w procesie wytłaczania konwencjonalnego przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka: a)  $v = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ; b)  $v = 4.22 \text{ s}^{-1}$ ; c)  $v = 4.38 \text{ s}^{-1}$ ; d)  $v = 4.58 \text{ s}^{-1}$ ; e)  $v = 4.77 \text{ s}^{-1}$  od czasu  $t$  wyjęcia ich z maszyny wytrzymałościowej



Rys. 5. Przebieg zmian wysokości  $h_2$  próbek po ustaniu działania siły, otrzymanych w procesie wytłaczania autotermicznego przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka: a)  $v = 4.0 \text{ s}^{-1}$ ; b)  $v = 4.22 \text{ s}^{-1}$ ; c)  $v = 4.38 \text{ s}^{-1}$ ; d)  $v = 4.58 \text{ s}^{-1}$ ; e)  $v = 4.77 \text{ s}^{-1}$  od czasu  $t$  wyjęcia ich z maszyny wytrzymałościowej

Wysokość badanych próbek wyjętych z maszyny wytrzymałościowej wzrasta po upływie: 0,5; 1,5; 2,5; 7,5; 19,5; 43,5; 67,5; 91,5 i 1000 godzin niezależnie od prędkości obrotowej ślimaka i rodzaju wytłaczania. Mechanizm ten określa lepkosprężyste zachowanie się tworzywa, które ma miejsce wtedy, gdy pod wpływem obciążenia całe segmenty łańcuchów przemieszczają się względem siebie [11, 12]. Po zdjęciu obciążenia następuje powrót segmentów do ich położenia początkowego. W przypadku polimerów powrót ten może trwać kilka godzin, a nawet miesięcy [13]. Wartości odkształcenia próbek, tuż po wyjęciu z urządzenia testującego, otrzymanych w procesie wytłaczania autotermicznego są niewiele większe niż w przypadku wytłaczania konwencjonalnego. Natomiast wzrost prędkości ślimaka, w obu rodzajach wytłaczania, skutkuje mniejszymi wartościami powrotu poodkształceniowego.

W tabeli 2 zaprezentowano właściwości lepkosprężystego tworzywa polimerowego, określone za pomocą: bezwzględnego skrócenia próbki, natychmiastowego

powrotu poodkształceniowego, opóźnionego powrotu poodkształceniowego oraz odkształcenia ściskającego.

Tab. 2. Wielkości charakteryzujące powrót poodkształceniowy po ściskaniu

Nr	Czas, h	Właściwości	Wytłaczanie	
			Konwencjonalne	Autotermiczne
1	0	$\Delta L$	9,56	9,33
		$\sigma$	10,44	10,67
		c	-	-
		e	-	-
2	0÷20	$\Delta L$	6,38	6,62
		$\sigma$	-	-
		c	3,18	2,71
		e	13,62	13,38
3	0÷1000	$\Delta L$	6,14	6,40
		$\sigma$	-	-
		c	3,42	2,93
		e	13,86	13,60

#### 4. PODSUMOWANIE

Próbki otrzymane podczas wytłaczania konwencjonalnego i autotermicznego z PE-LD i wykorzystane do przeprowadzenia próby statycznego ściskania do 50% ich początkowej wysokości wykazują, że badany wytwór zachowuje się jak materiał lepkosprężysty, który można opisać za pomocą mechanicznego modelu Burgersa. Model Burgersa lub ogólny model mechaniczny opisuje pełzanie polimerów amorficznych i składa się z kombinacji ciała Voigta-Kelvina i Maxwella [16, 17]. Pod wpływem naprężenia odkształcenie zmienia się w czasie i składa się z odkształcenia natychmiastowego i opóźnionego spowodowanego działaniem elementu lepkiego. Po usunięciu obciążenia następuje natychmiastowy powrót idealnie sprężystego elementu oraz powolny powrót poodkształceniowy elementu ciała idealnie lepkiego, przy czym powstaje odkształcenie trwałe jako skutek płynięcia lepkiego.

Dodatkowym spostrzeżeniem jest fakt większego całkowitego powrotu poodkształceniowego stwierdzonego dla próbek otrzymanych podczas wytłaczania konwencjonalnego, co może świadczyć o nieco większym stopniu mechanodegradacji i degradacji cieplnej polimeru podczas wytłaczania autotermicznego, mimo stosowania tych samych prędkości obrotowych ślimaka. Konstrukcja układu uplastyczniającego wytłaczarki W-25, a zwłaszcza ślimaka, umożliwia uzyskanie większego stopnia homogenizacji tworzywa, związanego z bardziej intensywnym jego mieszaniem oraz ścinaniem, co pociąga za sobą generowanie ciepła tarcia i wzrost temperatury tworzywa przetwarzanego. Potwierdzeniem tego mogą być również mniejsze wartości powrotu poodkształceniowego obserwowane przy coraz większych prędkościach ślimaka.

## LITERATURA

1. Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
2. Garbacz T., Sikora J.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: ćwiczenia laboratoryjne. Część 1*. Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
3. Ashby M. F., Jones D. R.: *Materiały inżynierskie: kształtowanie struktur i właściwości, dobór materiałów*. WNT, Warszawa 1996.
4. Żuchowska D.: *Polimery konstrukcyjne*, WNT, Warszawa 1995.
5. Cholewa M., Scelina D., Dulęba A.: *Wytrzymałość na ściskanie AlSi11/beton z polimerem siarkowym*. *Przetwórstwo tworzyw* 2012, 3, 174-178.
6. Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J.: *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, WNT, Warszawa 2000.
7. Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne formalne i terminologiczne*. Politechnika Lubelska, Lublin 2006.
8. Wilczyński K.: *Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych*. WNT, Warszawa 2001.
9. Wróbel G., Wierzbicki Ł., Szymiczek M.: *Ocena wpływu parametrów geometrycznych ciągnadła na powrót poodkształceniowy rur PE 100*. *Achievements in Mechanical & Materials Engineering, Conference Preceedings, Gliwice 2013*, 1049-1052.
10. Sikora J.: *Badania doświadczalne procesu wytłaczania autotermicznego polietylenu małej gęstości*. *Polimery* 1997, 9, 521-584.
11. Jakubowska P., Sterzyński T., Samujło B.: *Badania reologiczne kompozytów poliolefinowych o wysokim stopniu napełnienia z uwzględnieniem charakterystyk p-v-T*. *Polimery* 2010, 5, 379-389.
12. Szlezyngier W.: *Podstawy reologii polimerów*. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1994.
13. Richert J.: *Wpływ kredo na właściwości mechaniczne i reologiczne kompozytów polilaktydowych*. *Przetwórstwo tworzyw* 2012, 4, 352-355.
14. Ferry J. D.: *Lepkosprężystość polimerów*. WNT, Warszawa 1981.
15. Nielsen L. E., Landel R. F.: *Mechanical properties of polymers and composites*. Marcel Dekker Inc. New York 1994.
16. ISO 604:2006: *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości podczas ściskania*.
17. Khan M., Hyder S. A., Haitao Q.: *On accelerated flows of a viscoelastic fluid with the fractional Burgers' model*. *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 2009, 10, 2286-2296.
18. Gupta R. K.: *Polymer and composite rheology*. Marcel Dekker Inc. New York 2000.