

EMIL SASIMOWSKI

Politechnika Lubelska

Katedra Procesów Polimerowych

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

e-mail: e.sasimowski@pollub.pl

Badania efektywności działania wyłaczarki nowej generacji

Cz. III. WSPÓLDZIAŁANIE TULEI OBROTOWEJ ZE STREFĄ ROWKOWANĄ CYLINDRA

Streszczenie — Określano wpływ zastosowania, w układzie uplastyczniającym jednoślimakowym, tulei obrotowej cylindra, współdziałającej ze strefą rowkowaną cylindra, na przebieg procesu wyłaczania polietylenu małej gęstości (PE-LD). Badania przeprowadzono na specjalnym stanowisku badawczym, wyposażonym w wyłaczarkę z układem uplastyczniającym o budowie segmentowej, zawierającym segment z tuleją obrotową cylindra oraz strefę rowkowaną cylindra, zamiennie, z sześcioma lub ośmioma rowkami prostoliniowymi. Podczas wyłaczania PE-LD przy zmiennej szybkości ślimaka oraz szybkości tulei obrotowej cylindra określano wybrane czynniki charakteryzujące proces. Stwierdzono, że zastosowanie w układzie uplastyczniającym strefy rowkowanej cylindra, współdziałającej z tuleją obrotową cylindra, ma znaczący wpływ na efektywność oddziaływania tulei i przebieg całego procesu wyłaczania.

Słowa kluczowe: wyłaczanie, wyłaczarka jednoślimakowa, tuleja obrotowa cylindra, strefa rowkowana.

STUDIES IN THE EFFECTIVENESS OF A NEW GENERATION EXTRUDER. Part III. CO-OPERATION OF THE ROTATIONAL SLEEVE WITH THE GROOVED ZONE OF BARREL

Summary — The effect of application of the rotational sleeve of the barrel cooperating with grooved barrel zone in the single screw plasticizing system on the course of low density polyethylene (PE-LD) extrusion process was determined. Research was conducted on a special test stand with an extruder equipped with plasticizing system of modular structure, containing a segment with a rotating sleeve of the barrel and a grooved cylinder zone, interchangeably, with six and eight rectilinear grooves. Selected parameters characterizing the extrusion process were determined during the extrusion of PE-LD with a variable screw speed and barrel sleeve rotation speed. It was found that the use of a grooved cylinder zone cooperating with a rotating sleeve of the barrel in the plasticizing system has a significant impact on the effectiveness of sleeve and the course of the extrusion process. Increasing the polymer mass flow rate with rotation speed of the sleeve is in the whole range screw speed test, which was not observed in the case of a uniform zone geometry, cylindrical without grooves.

Keywords: extrusion, single screw extruder, rotating sleeve of the barrel, grooved zone.

Prezentowana praca dotyczy kolejnego etapu kompleksowych badań efektywności działania jednoślimakowej wyłaczarki nowej generacji.

W poprzedniej części pracy^{*)} ustalono, że spośród badanych rozwiązań konstrukcyjnych układu uplastyczniającego, najkorzystniejsze ze względu na największe masowe natężenie przepływu tworzywa oraz, równocześnie, najmniejsze jednostkowe zużycie energii, jest

zastosowanie tulei obrotowej cylindra z rowkami prostoliniowymi o przekroju poprzecznym trójkątnym. Zaobserwowano również, że zwiększanie szybkości tulei obrotowej z tego rodzaju rowkami, przy dużej szybkości ślimaka, nie powoduje wzrostu natężenia przepływu tworzywa, co jest efektem ograniczonego jego przepływu przez, poprzedzające tuleję obrotową, strefy funkcjonalne układu uplastyczniającego.

Biorąc powyższe ustalenia pod uwagę, w celu zintensyfikowania przepływu w układzie uplastyczniającym,

^{*)} Cz. II.: *Polimery* 2012, 57, 296.

zastosowano w nim strefę rowkowaną cylindra. Tego rodzaju strefa cylindra wpływa na zwiększenie tarcia tworzywa o powierzchnię cylindra, ukierunkowanie ruchu tworzywa wzdłuż rowków, wzrost ciśnienia tworzywa i w konsekwencji wzrost natężenia przepływu tworzywa [1–8].

Celem przedstawionej pracy była ocena wpływu zastosowania strefy rowkowanej cylindra, w układzie uplastyczniającym wyposażonym w tuleję obrotową, na charakterystykę procesu wytłaczania. Badania polegały na wykonywaniu, podczas procesu wytłaczania polietylenu małej gęstości, pomiaru wybranych czynników określonych bezpośrednio i wyznaczeniu na ich podstawie wielkości charakteryzujących ten proces. Korzystano z wytłaczarki nowej generacji z układem uplastyczniającym wyposażonym w strefę rowkowaną cylindra z sześcioma lub ośmioma rowkami prostoliniowymi, stosując zmienną szybkość ślimaka oraz tulei obrotowej cylindra.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

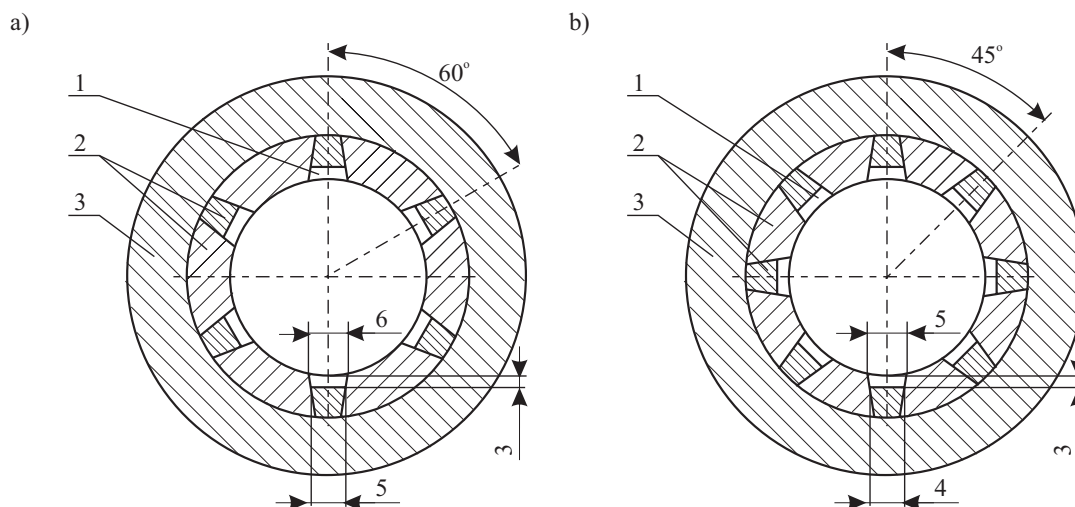
Materiały

Przetwarzaniu poddano polietylen małej gęstości o nazwie handlowej Malen E i symbolu FG NX, 23-D006, wyprodukowany w postaci granulatu przez firmę Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o. [9].

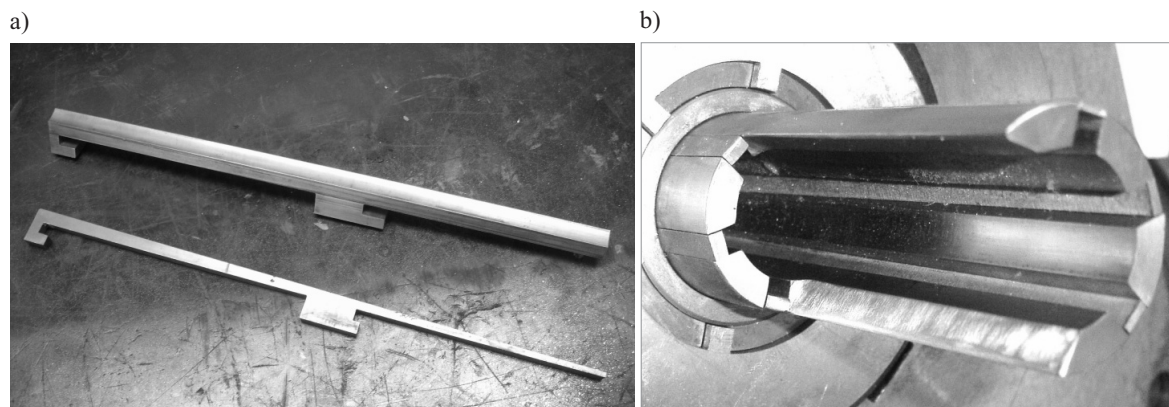
Stanowisko badawcze

W badaniach wykorzystano specjalne stanowisko badawcze, wyposażone w wytłaczarkę W-25 z układem uplastyczniającym nowej konstrukcji, mającym tuleję obrotową cylindra, szczegółowo opisane w poprzedniej części pracy [10].

Zastosowano układ uplastyczniający o wydajności największej spośród wcześniej badanych, zmodyfikowany w wyniku wprowadzenia strefy rowkowanej cylindra, obejmującej strefę zasypu oraz część strefy zasilania. Wykorzystano mianowicie układ uplastyczniający ze ślimakiem specjalnym o średnicy $D = 25$ mm i stosunku $L/D = 24$, przeznaczonym do przetwórstwa polietylenu małej gęstości oraz z tuleją obrotową cylindra o długości $5D$, z sześcioma, wykonanymi na jej powierzchni wewnętrznej, rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, każdy o głębokość 1,5 mm oraz o kącie wierzchołkowym wynoszącym 65° . Tuleję obrotową cylindra umieszczono w II-giej strefie układu uplastyczniającego; na takie, korzystne jej umiejscowienie, wskazały wyniki uzyskane w Cz. I [10]. Zastosowano opatentowane rozwiązanie konstrukcyjne strefy rowkowanej cylindra [11] z 6. lub 8. rowkami. Strefa ta była zbudowana, odpowiednio, z 12 lub 16, złączonych ze sobą powierzchniami bocznymi segmentów (rys. 1 i 2), tworzących tuleję rowkowaną z otworem wewnętrznym, takim samym, jak w pozostałych częściach składowych cylindra. Rowki wewnątrz tulei miały zmienną głębokość, największą – 3 mm na początku strefy zasypu i zmniejszającą się na długości 200 mm, do zaniku w strefie zasilania. W przekroju poprzecznym rowki miały kształt trapezu równoramiennego. W przypadku tulei z 6. rowkami, szerokość podstawy trapezu od strony ślimaka wynosiła 6 mm, druga podstawa trapezu miała natomiast szerokość 5 mm. W tulei z 8. rowkami szerokość podstaw trapezu wynosiła, odpowiednio, 5 mm i 4 mm. W celu zapewnienia transportowania tworzywa w stanie stałym oraz uniemożliwienia ewentualnego wyciskania tworzywa uplastycznionego przez szczeliny boczne między segmentami, tuleja w strefie zasypu była termostatowana przy użyciu termostatu wodnego.



Rys. 1. Schemat przekroju poprzecznego w strefie zasypu strefy rowkowanej cylindra z: a) 6. rowkami wzdłużnymi, b) 8. rowkami wzdłużnymi; 1 – rowki o zmiennej głębokości, 2 – segmenty tworzące tuleję rowkowaną, 3 – cylinder
 Fig. 1. The scheme of cross-section in the filling zone of the grooved barrel with: a) six longitudinal grooves, b) eight longitudinal grooves; 1 – grooves with variable depth, 2 – segments forming a grooved sleeve, 3 – barrel



Rys. 2. Wygląd: a) segmentów tworzących tuleję rowkowaną, b) strefy rowkowanej od strony zasypu
 Fig. 2. The view of: a) segments forming grooved sleeve, b) grooved zone on the filling side

Program i metodyka badań

W celu zapewnienia porównywalności wyników uzyskanych we wszystkich trzech częściach pracy, do badań użyto takiego samego tworzywa oraz przyjęto taką samą wartość temperatury nastawianej w poszczególnych strefach układu uplastyczniającego wylączarki. Zakres czynników badanych bezpośrednio oraz pośrednio, charakteryzujących badany proces wytłaczania, a także określające właściwości otrzymanej wycieczki, były również takie same [10].

Wartość temperatury nastawianej w poszczególnych strefach układu uplastyczniającego wylączarki, wynosiła, odpowiednio, $T_I = 80\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{II} = 160\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{III} = 170\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{IV} = 180\text{ }^\circ\text{C}$, $T_V = 175\text{ }^\circ\text{C}$, a temperatury głowicy wylączarskiej $T_{VI} = 165\text{ }^\circ\text{C}$ oraz $T_{VII} = 165\text{ }^\circ\text{C}$. W chłodzonej wodą strefie zasypu ustalono temperaturę $T_0 = 40\text{ }^\circ\text{C}$. Pomiary czynników określanych bezpośrednio przeprowadzono przy szybkości ślimaka $n_s = 1,67; 3,33; 5,00; 6,67$ oraz $8,33\text{ s}^{-1}$, gdy tuleja obrotowa była nieruchoma, jak również, gdy wykonywała ruch obrotowy w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, z szybkością $n_c = 0,83; 1,67; 2,50$ oraz $3,33\text{ s}^{-1}$. Po każdej zmianie warunków wytłaczania, przed przystąpieniem do pomiarów stabilizowano proces w ciągu kilkanaście minut. Jeśli obserwowano dalsze zachodzące zmiany rozkładu temperatury układu uplastyczniającego, czas stabilizacji stosownie wydłużano do 20–30 min.

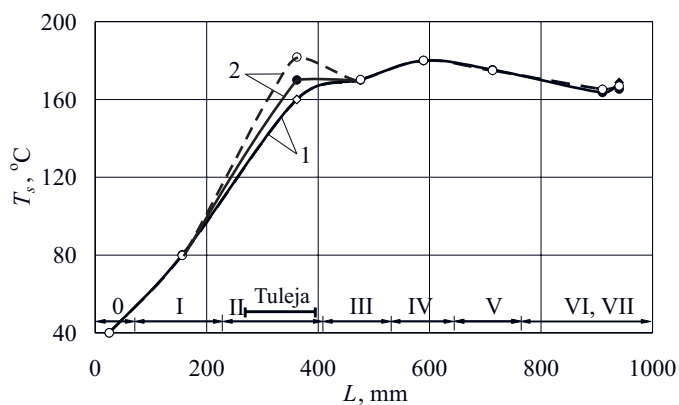
WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Temperatura ścianki cylindra

Przebieg zmian temperatury ścianki cylindra oraz głowicy wylączarskiej w funkcji ich długości L , w skrajnych (spośród badanych) warunkach szybkości ślimaka $n_s = 1,67$ i $8,33\text{ s}^{-1}$ oraz szybkości tulei obrotowej cylindra $n_c = 0; 3,33\text{ s}^{-1}$, w układzie uplastyczniającym ze strefą z 6. lub 8. rowkami, przedstawiają rys. 3 i 4.

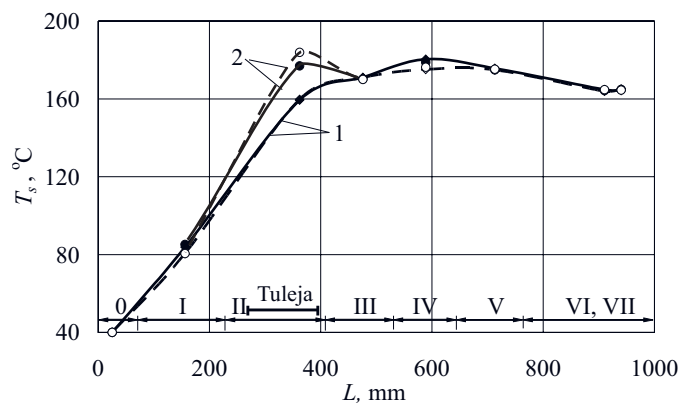
W przypadku, gdy tuleja obrotowa cylindra pozostawała nieruchoma a obracał się tylko ślimak, temperatura

zarówno ścianki cylindra jak i głowicy wylączarskiej, utrzymywała się na wstępnie zadanej wartości. Analogicznie, jak to zaobserwowano w poprzednich częściach pracy, wprawienie w ruch tulei obrotowej cylindra powodowało wzrost temperatury ścianki cylindra w tej strefie grzejnej, w której była ona umieszczona. Ogólny charakter tych zmian temperatury jest podobny w przypadku wszystkich badanych szybkości ślimaka, ich intensywność natomiast zależy zarówno od szybkości tulei obrotowej, jak i od rozwiązania konstrukcyjnego zastosowanej strefy rowkowanej cylindra.



Rys. 3. Temperatura ścianki (T_s) cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wylączarskiej w funkcji ich długości (L); szybkość ślimaka $n_s = 1,67\text{ s}^{-1}$, szybkość tulei obrotowej cylindra n_c : 1 – $0,0\text{ s}^{-1}$, 2 – $3,33\text{ s}^{-1}$, 0–V – strefy grzejne układu uplastyczniającego, VI, VII – strefy grzejne głowicy wylączarskiej, linie ciągłe – strefa rowkowana cylindra z 6. rowkami, linie przerywane – strefa rowkowana cylindra z 8. rowkami

Fig. 3. The barrel wall temperature (T_s) of the plasticizing system and the extruder head as a function of their length (L); screw speed $n_s = 1.67\text{ s}^{-1}$; barrel sleeve rotation speed n_c : 1 – 0.0 s^{-1} , 2 – 3.33 s^{-1} , 0–V – heating zones of the plasticizing system, VI, VII – heating zones of the extruder head, solid lines – grooved zone of the barrel with six grooves, dashed lines – grooved zone of the barrel with eight grooves

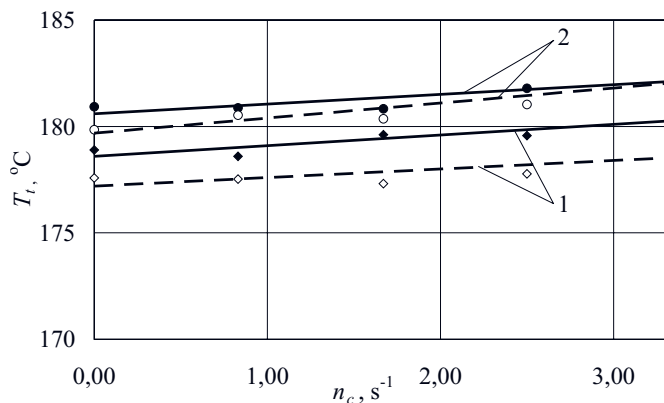


Rys. 4. Temperatura ścianki (T_s) cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej w funkcji ich długości (L); szybkość ślimaka $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$, szybkość tulei obrotowej cylindra n_c : 1 — $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, pozostałe oznaczenia, jak na rys. 3
Fig. 4. The barrel wall temperature (T_s) of the plasticizing system and the extruder head as a function of their length (L); screw speed $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$; barrel sleeve rotation speed n_c : 1 — $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, other designations as in Fig. 3

W warunkach najmniejszej z badanych szybkości ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$ (rys. 3), wzrost temperatury ścianki cylindra w wyniku oddziaływania tulei obrotowej z szybkością $3,33 \text{ s}^{-1}$, wyniósł 10 °C powyżej wartości zadanej, gdy zastosowano strefę cylindra z 6. rowkami. Po zastosowaniu strefy cylindra z 8. rowkami, wzrost temperatury ścianki cylindra był znacznie większy i wyniósł 22 °C . Przy największej szybkości ślimaka $8,33 \text{ s}^{-1}$ (rys. 4) wzrost temperatury ścianki powyżej wartości zadanej był wyraźnie większy i wyniósł 17 °C , gdy zastosowano strefę cylindra z 6. rowkami oraz 24 °C , gdy zastosowano strefę cylindra z 8. rowkami. Przyczyny takiego wzrostu należy upatrywać w generowaniu ciepła tarcia bezpośrednio w przetwarzanym tworzywie zarówno w wyniku oddziaływania tulei obrotowej cylindra, jak i występującego w strefie rowkowanej cylindra, która przyczynia się do wzrostu tarcia tworzywa o powierzchnię cylindra [4, 5, 12].

Temperatura przetwarzanego tworzywa

Mierzona w kanale przepływowym przed głowicą wytłaczarską temperatura przetwarzanego tworzywa nie ulegała istotnym zmianom w wyniku oddziaływania tulei obrotowej cylindra w badanym zakresie jej szybkości (rys. 5). Wzrost tej temperatury, zaobserwowany przy największej szybkości tulei obrotowej cylindra, w większości przypadków nie przekraczał $1,5 \text{ °C}$. Wpływ szybkości ślimaka na temperaturę przetwarzanego tworzywa także nie był istotny. Zwiększenie szybkości ślimaka z $1,67 \text{ s}^{-1}$ do $8,33 \text{ s}^{-1}$, w układzie ze strefą rowkowaną cylindra z 6. rowkami, spowodowało wzrost temperatury tworzywa średnio o 2 °C , a o 3 °C w odniesieniu do strefy rowkowanej cylindra z 8. rowkami.



Rys. 5. Temperatura przetwarzanego tworzywa (T_i) w kanale przepływowym przed głowicą wytłaczarską, w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), w warunkach wzrostu szybkości obrotów ślimaka n_s : 1 — $1,67 \text{ s}^{-1}$, 2 — $8,33 \text{ s}^{-1}$, oznaczenia linii, jak na rys. 3

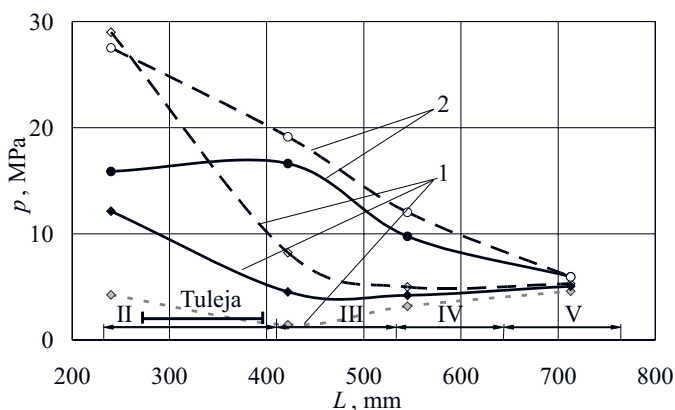
Fig. 5. Temperature of the processed polymer (T_i) in the flow channel before the extrusion head as a function of barrel sleeve rotation speed (n_c), for increasing screw rotation speed n_s : 1 — $1,67 \text{ s}^{-1}$, 2 — $8,33 \text{ s}^{-1}$, line designations as in Fig. 3

Zastosowanie strefy rowkowanej z 6. rowkami skutkowało nieznacznie większymi wartościami temperatury tworzywa w porównaniu z temperaturą uzyskiwaną w przypadku strefy z 8. rowkami. Różnice te wynosiły średnio tylko $1,5 \text{ °C}$ przy szybkości ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$ oraz $0,5 \text{ °C}$ przy szybkości ślimaka $8,33 \text{ s}^{-1}$.

Ciśnienie tworzywa

Rozkład ciśnienia przetwarzanego tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego w warunkach granicznych szybkości ślimaka i tulei obrotowej cylindra, po zastosowaniu w układzie uplastyczniającym strefy rowkowanej z 6. oraz 8. rowkami przedstawiono na rys. 6 i 7. Dla porównania zamieszczono też rozkład ciśnienia tworzywa, obserwowany w przypadku układu ze strefą zasypu i zasilania cylindra jednolitą geometrycznie, walcową bez rowków.

Wprowadzenie strefy rowkowanej spowodowało wyraźną zmianę rozkładu ciśnienia tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego. W warunkach nieruchomej tulei obrotowej cylindra, zastosowanie strefy rowkowanej cylindra z 6. rowkami, wpływało na wzrost ciśnienia tworzywa przed tuleją, przy szybkości ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$, od $4,3 \text{ MPa}$ do $12,1 \text{ MPa}$, w przypadku strefy rowkowanej cylindra z 8. rowkami — aż do $29,0 \text{ MPa}$. Gdy szybkość ślimaka była największa ($8,33 \text{ s}^{-1}$), wykorzystanie strefy rowkowanej cylindra z 6. lub 8. rowkami spowodowało także wzrost ciśnienia w tym punkcie pomiarowym do, odpowiednio, $16,2$ i $21,3 \text{ MPa}$. W warunkach szybkości ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$, w wyniku zastosowania strefy rowkowanej, ciśnienie tworzywa bezpośrednio za tuleją obrotową również ulegało wzrostowi z $1,4 \text{ MPa}$ do, odpowiednio, $4,5 \text{ MPa}$ i $8,2 \text{ MPa}$, a przy największej szybkości ślimaka

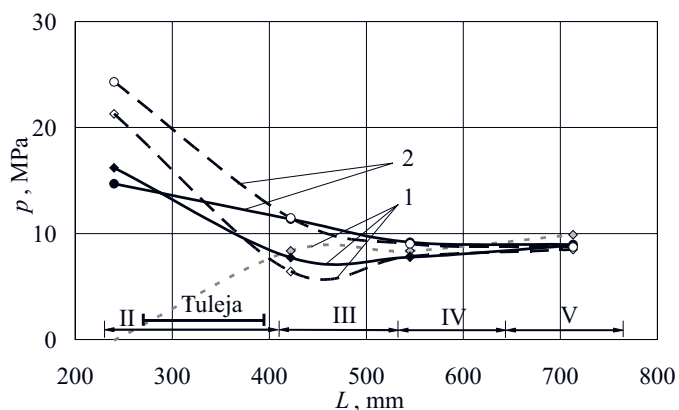


Rys. 6. Ciśnienie tworzywa (p) w funkcji długości układu uplastyczniającego (L); szybkość ślimaka $n_s = 1,67 \text{ s}^{-1}$, szybkość tulei obrotowej cylindra n_c : 1 — $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, linie punktowe — strefa zasypu i zasilania cylindra jednolita geometrycznie, walcowa bez rowków, pozostałe oznaczenia, jak na rys. 3

Fig. 6. Polymer pressure (p) as a function of the length of the plasticizing system (L); screw speed $n_s = 1,67 \text{ s}^{-1}$, barrel sleeve rotation speed n_c : 1 — $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, dotted lines — filling and feeding zones of the barrel, geometrically uniform, cylindrical without grooves, other designations as in Fig. 3

$8,33 \text{ s}^{-1}$ — nieznacznemu obniżeniu z $8,4 \text{ MPa}$ do, odpowiednio, $7,7 \text{ MPa}$ i $6,4 \text{ MPa}$. Podobny charakter zmian ciśnienia obserwowano w kolejnych punktach pomiarowych, usytuowanych w IV oraz V strefie grzejnej układu uplastyczniającego. Przy szybkości ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$, w wyniku zastosowania strefy rowkowanej ulegało ono zwiększeniu maksymalnie o $1,8 \text{ MPa}$, natomiast przy szybkości ślimaka $8,33 \text{ s}^{-1}$ — obniżeniu o maksymalnie $1,3 \text{ MPa}$.

Wprawienie w ruch tulei obrotowej cylindra, o kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, wpływało na kolejną zmianę rozkładu ciśnienia tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego. Wraz ze zwiększaniem szybkości tulei obrotowej następował wzrost ciśnienia tworzywa, największy bezpośrednio za tuleją i coraz mniejszy w kolejnych punktach pomiarowych w kierunku głowicy wylączarskiej. Maksymalny wzrost ciśnienia wystąpił przy największej z badanych szybkości tulei obrotowej, wynoszącej $3,33 \text{ s}^{-1}$. Gdy szybkość ślimaka wynosiła $1,67 \text{ s}^{-1}$, wartość ciśnienia mierzona bezpośrednio za tuleją obrotową, zwiększyła się o $12,1 \text{ MPa}$ w przypadku zastosowania strefy rowkowanej z 6. rowkami oraz o $10,9 \text{ MPa}$ po zastosowaniu strefy rowkowanej z 8. rowkami (wartość ciśnienia była wówczas największa i wynosiła $19,1 \text{ MPa}$). W następnym punkcie pomiarowym, usytuowanym w IV strefie grzejnej, wzrost ciśnienia tworzywa wyniósł $5,6$ (strefa z 6. rowkami) oraz $7,0 \text{ MPa}$ (strefa z 8. rowkami). Bezpośrednio przed głowicą wylączarską wartości ciśnienia tworzywa były porównywalne, nadal jednak większe niż przy nieruchomej tulei cylindra — maksymalny wzrost ciśnienia wyniósł tam $0,7 \text{ MPa}$.



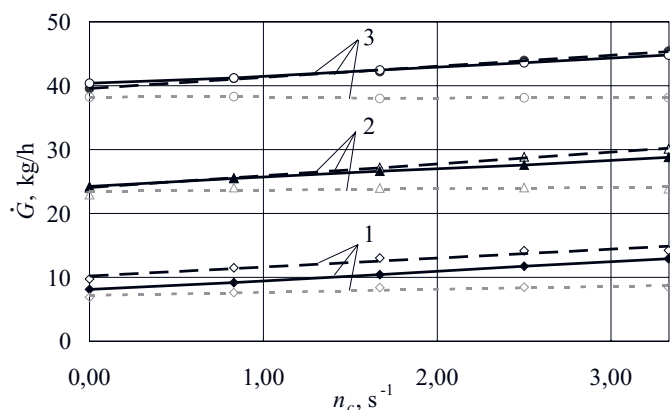
Rys. 7. Ciśnienie tworzywa (p) w funkcji długości układu uplastyczniającego (L); szybkość ślimaka $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$, szybkość tulei obrotowej cylindra n_c : 1 — $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, linie punktowe — strefa zasypu i zasilania cylindra jednolita geometrycznie, walcowa bez rowków, pozostałe oznaczenia, jak na rys. 3

Fig. 7. Polymer pressure (p) as a function of the length of the plasticizing system (L); screw speed $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$, barrel sleeve rotation speed n_c : 1 — $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, dotted lines — filling and feeding zones of the barrel, geometrically uniform, cylindrical without grooves, other designations as in Fig. 3

W warunkach największej z badanych szybkości ślimaka ($8,33 \text{ s}^{-1}$), charakter zmian ciśnienia tworzywa znajdującego się w układzie uplastyczniającym, w wyniku zwiększania szybkości tulei obrotowej był podobny, jego wzrost bezpośrednio za tuleją obrotową oraz w kolejnych punktach pomiarowych był jednak znacznie mniejszy (rys. 7). W rezultacie oddziaływania tulei, obracającej się z szybkością $3,33 \text{ s}^{-1}$, wartość ciśnienia mierzona bezpośrednio za tuleją obrotową, zwiększyła się o $3,7 \text{ MPa}$ — w przypadku strefy rowkowanej z 6. rowkami oraz o $5,1 \text{ MPa}$ po zastosowaniu strefy rowkowanej z 8. rowkami. W konsekwencji, w obu rozwiązaniach strefy rowkowanej otrzymano taką samą wartość ciśnienia $11,5 \text{ MPa}$. W kolejnym punkcie pomiarowym ciśnienie tworzywa zwiększało się o, odpowiednio, $1,4$ oraz $1,2 \text{ MPa}$, przybierając również zbliżone wartości $9,0$ – $9,2 \text{ MPa}$. Bezpośrednio przed głowicą wylączarską wartości ciśnienia tworzywa były podobne, a wzrost ciśnienia w wyniku oddziaływania obracającej się tulei cylindra nie przekraczał $0,2 \text{ MPa}$.

Natężenie przepływu tworzywa

Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że zastosowanie strefy rowkowanej cylindra zarówno z 6., jak i 8. rowkami spowodowało zwiększenie masowego natężenia przepływu tworzywa w porównaniu z uzyskiwanym w przypadku strefy zasypu i zasilania jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków (rys. 8). Natężenie przepływu w układzie ze strefą rowkowaną z 6. rowkami, przy nieruchomej tulei obrotowej cylindra wzrosło, odpowiednio, o $17,5$; $8,6$; $5,5$; $3,2$ oraz $5,7 \%$



Rys. 8. Masowe natężenie przepływu tworzywa (\dot{G}) w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), szybkość obrotów ślimaka n_s : 1 – $1,67 s^{-1}$, 2 – $5,00 s^{-1}$, 3 – $8,33 s^{-1}$, linie ciągłe – strefa rowkowana cylindra z 6. rowkami, linie przerywane – strefa rowkowana cylindra z 8. rowkami, linie punktowe – strefa zasypu i zasilania cylindra, jednolita geometrycznie, walcowa bez rowków

Fig. 8. Polymer mass flow rate (\dot{G}) as a function of the barrel sleeve rotation speed (n_c), screw rotation speed n_s : 1 – $1.67 s^{-1}$, 2 – $5.00 s^{-1}$, 3 – $8.33 s^{-1}$, solid lines – grooved zone of the barrel with six grooves, dashed lines – grooved zone of the barrel with eight grooves, dotted lines – filling and feeding zones of the barrel, geometrically uniform, cylindrical without grooves

w odniesieniu do kolejnych, zwiększanych szybkości ślimaka.

Wprawienie współdziałającej ze strefą rowkowaną tulei obrotowej cylindra w ruch, o kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, powoduje dalsze, proporcjonalne zwiększanie się masowego natężenia przepływu tworzywa wraz ze wzrostem szybkości obrotów tulei. Tuleja cylindra obracająca się z szybkością $3,33 s^{-1}$, współdziałając ze strefą rowkowaną z 6. rowkami wpływa na wzrost natężenia przepływu w stosunku do uzyskiwanego wówczas, gdy tuleja obrotowa cylindra jest nieruchoma, odpowiednio, o 59,5; 28,4; 18,9; 13,6 oraz 10,9 %, przy kolejnej, większej szybkości ślimaka. Natężenie przepływu było wówczas większe, odpowiednio, o 53,3; 23,9; 20,6; 17,9 i 17,6 %, od występującego, gdy obracająca się tuleja cylindra współdziałała ze strefą zasypu i zasilania jednolitą geometrycznie, walcową bez rowków.

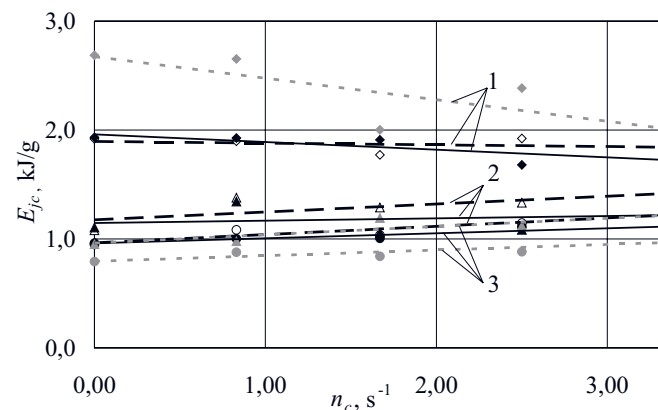
Po zastosowaniu strefy rowkowanej z 8. rowkami wzrost masowego natężenia przepływu tworzywa był jeszcze większy. W przypadku, gdy tuleja obrotowa cylindra jest nieruchoma, większy wzrost występuje tylko w ograniczonym zakresie szybkości ślimaka i wynosi, odpowiednio, 41,7 % oraz 16,6 % w odniesieniu do szybkości ślimaka $1,67$ oraz $3,33 s^{-1}$. Wartości otrzymane przy większych szybkościach ślimaka, odpowiadały uzyskanym po zastosowaniu tulei z 6. rowkami. W przypadku, gdy tuleja cylindra obracająca się z szybkością $3,33 s^{-1}$ współdziałała ze strefą rowkowaną z 8. rowkami, zwiększenie natężenia przepływu w stosunku do uzyskiwanego, gdy tuleja była nieruchoma wyniosło, odpowiednio,

46,0; 25,3; oraz 14,8 % w przypadku kolejno zwiększanej szybkości ślimaka. W porównaniu z natężeniem uzyskiwanym po zastosowaniu strefy z 6. rowkami było ono większe, odpowiednio, o 9,3; 4,3 oraz 1,4 %.

Największe masowe natężenie przepływu – 45,4 kg/h – uzyskano, podobnie jak na poprzednich etapach pomiarów, w warunkach największej badanej szybkości ślimaka i tulei obrotowej cylindra, po zastosowaniu strefy rowkowanej z 8. rowkami.

Jednostkowe zużycie energii

Po wprowadzeniu do układu strefy rowkowanej zarówno z 6., jak i 8. rowkami, jednostkowe zużycie energii jest wyraźnie mniejsze niż w przypadku strefy jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków, ale tylko przy szybkości ślimaka $1,67 s^{-1}$ (rys. 9). W warunkach nieruchomej tulei cylindra, zmniejszenie to wynosi aż ok. 28 %



Rys. 9. Jednostkowe zużycie energii całkowitej (E_{jc}) doprowadzanej do wyciązarki, w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), szybkość obrotów ślimaka n_s : 1 – $1,67 s^{-1}$, 2 – $5,00 s^{-1}$, 3 – $8,33 s^{-1}$, oznaczenia linii, jak na rys. 8

Fig. 9. Specific total energy consumption by the extruder (E_{jc}) as a function of the barrel sleeve rotation speed (n_c), screw rotation speed n_s : 1 – $1.67 s^{-1}$, 2 – $5.00 s^{-1}$, 3 – $8.33 s^{-1}$, line designations as in Fig. 8

po zastosowaniu strefy z 6. lub 8. rowkami, oraz, odpowiednio, 12 % i 8,0 % gdy strefa rowkowana współdziałała z tuleją cylindra obracającą się z największą badaną szybkością. Przy większych szybkościach ślimaka jednostkowe zużycie energii po zastosowaniu strefy rowkowanej, jest nieznacznie większe niż w przypadku strefy jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków. Wyznaczone dla strefy rowkowanej z 6. lub 8. rowkami zależności mają podobny przebieg, jednak jednostkowe zużycie energii jest zawsze nieznacznie mniejsze w przypadku strefy z 6. rowkami.

Wzrost szybkości ślimaka wpływa na zmniejszenie jednostkowego zużycia energii w następstwie przeważającego wzrostu natężenia przepływu tworzywa nad

zwiększeniem strumienia energii doprowadzanej do wylączarki. W wyniku pięciokrotnego zwiększenia szybkości ślimaka od 1,67 do 8,33 s⁻¹, przy nieruchomej tulei obrotowej cylindra, jednostkowe zużycie energii obniżyło się o ok. 50 % — po zastosowaniu strefy rowkowanej z 6. lub 8. rowkami oraz o 70 % w przypadku strefy jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków. Uzyskano wówczas najmniejsze jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki, wynoszące 0,8 kJ/g dla strefy jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków oraz 1,0 kJ/g, dla strefy rowkowanej z 6. lub 8. rowkami. Zmniejszenie jednostkowego zużycia energii wraz ze zwiększaniem szybkości tulei obrotowej występuje tylko w przypadku najmniejszej badanej szybkości ślimaka 1,67 s⁻¹. Gdy tuleja obrotowa współdziałała ze strefą jednolitą geometrycznie, walcową, zmniejszenie E_{jc} było największe (25,6 %) a po zastosowaniu strefy rowkowanej z 6. rowkami wyniosło 13,0 %. W przypadku strefy rowkowanej z 8. rowkami, przy najmniejszej badanej szybkości ślimaka, zwiększanie szybkości tulei obrotowej cylindra nie wpływa na jednostkowe zużycie energii, które wynosi wówczas 1,8–1,9 kJ/g.

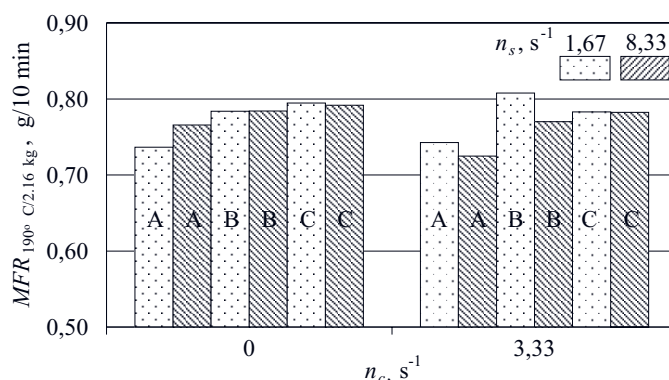
W przypadku pozostałych badanych szybkości ślimaka, zwiększanie szybkości tulei obrotowej cylindra nie wpływa na jednostkowe zużycie energii lub powoduje jego nieznaczny wzrost o 0,3 kJ/g. Ma to związek z tym, że im większa jest szybkość ślimaka, tym mniejszy jest proporcjonalny przyrost natężenia przepływu spowodowany oddziaływaniem obracającej się z taką samą szybkością w kierunku przeciwnym, tulei cylindra.

Masowy wskaźnik szybkości płynięcia

Wyniki pomiarów masowego wskaźnika szybkości płynięcia [$MFR(190\text{ }^{\circ}\text{C}/2,16\text{ kg})$] próbek pobranych z otrzymanej wylączarki wykazały małe zróżnicowanie wartości średnich (rys. 10). Średnia arytmetyczna obliczona ze wszystkich uzyskanych wyników wyniosła 0,77 g/10 min, odchylenie standardowe tylko 0,025, współczynnik zmienności natomiast 3,29 %. W celach porównawczych wykonano także pomiary masowego wskaźnika szybkości płynięcia 10 próbek granulatu pobranych losowo z całej partii tworzywa przetwarzanego. Otrzymana średnia z pomiarów próbek granulatu tworzywa przetwarzanego wyniosła $0,78 \pm 0,015$ g/10 min, przy odchyleniu standardowym 0,009 g/10 min. Można zatem przyjąć, że w przetwarzanym tworzywie nie nastąpiły niekorzystne zmiany.

Wytrzymałość na rozciąganie

Na podstawie pomiarów wytrzymałości na rozciąganie próbek wyciętych z otrzymanej wylączarki, nie stwierdzono wyraźnej tendencji zmian wyznaczonych wartości średnich (rys. 11). Przeprowadzona analiza wariancji ANOVA [13], nie wykazała istotnego wpływu zastosowania strefy rowkowanej oraz wpływu szybkości

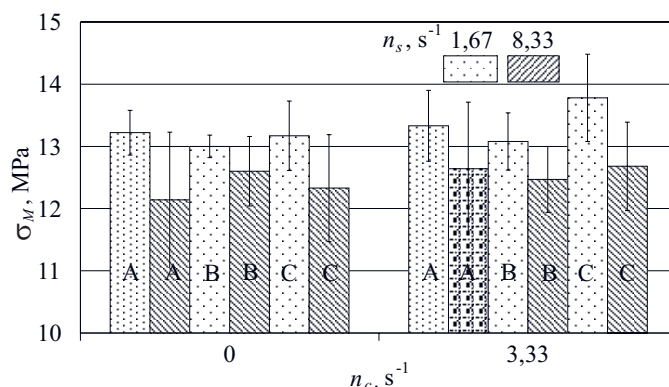


Rys. 10. Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (MFR) wylączarki otrzymanej w skrajnych warunkach szybkości ślimaka (n_s) oraz szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), współdziałającej ze strefą rowkowaną: A — jednolitą geometrycznie, walcową bez rowków, B — z 6. rowkami, C — z 8. rowkami

Fig. 10. The mass flow rate (MFR) of the extrudate processed at the lowest and highest values of the screw speed (n_s) and the barrel sleeve rotation speed (n_c) cooperating with grooved zone: A — geometrically uniform, cylindrical without grooves, B — with six grooves, C — with eight grooves

tulei obrotowej cylindra na wytrzymałość próbek otrzymanej wylączarki.

Na uwagę zasługuje fakt, że korzystne pod względem natężenia przepływu, wprowadzenie do układu uplastyczniającego tulei obrotowej cylindra współdziałającej ze strefą rowkowaną nie powoduje istotnych zmian wytrzymałości na rozciąganie uzyskiwanej wylączarki.



Rys. 11. Wytrzymałość na rozciąganie (σ_M) wylączarki otrzymanej w skrajnych warunkach szybkości ślimaka (n_s) oraz szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c) współdziałającej ze strefą rowkowaną: A — jednolitą geometrycznie, walcową bez rowków, B — z 6. rowkami, C — z 8. rowkami

Fig. 11. Tensile strength (σ_M) of the extrudate processed at the lowest and highest values of the screw speed (n_s) and the barrel sleeve rotation speed (n_c) cooperating with grooved zone: A — geometrically uniform, cylindrical without grooves, B — with six grooves, C — with eight grooves

PODSUMOWANIE

– Wykorzystanie w układzie uplastyczniającym strefy rowkowanej powoduje zwiększenie masowego natężenia przepływu tworzywa, w porównaniu z uzyskiwanym w przypadku zastosowania tulei cylindra jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków. Wynika to głównie ze znacznej zmiany rozkładu ciśnienia tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego, ze strefą rowkowaną cylindra.

– Oddziaływanie tulei obrotowej cylindra, współdziałającej ze strefą rowkowaną, powoduje znaczne zwiększenie ciśnienia tworzywa w obszarze bezpośrednio za tuleją obrotową, a w konsekwencji proporcjonalne do jej szybkości zwiększanie natężenia przepływu tworzywa.

– Zwiększanie natężenia przepływu tworzywa wraz z szybkością tulei obrotowej występuje w całym zakresie badanych szybkości ślimaka, czego nie obserwowano w przypadku stosowania strefy jednolitej geometrycznie, walcowej bez rowków.

– Większy wzrost masowego natężenia przepływu tworzywa występuje w odniesieniu do strefy rowkowanej z 8. rowkami niż strefy z 6. rowkami, ale tylko w zakresie ograniczonym do małych szybkości ślimaka. Przy większych szybkościach ślimaka, natężenie przepływu w przypadku obu rozwiązań strefy rowkowanej jest porównywalne.

– Jednostkowe zużycie energii w całym badanym zakresie szybkości ślimaka i tulei obrotowej cylindra jest zawsze nieznacznie mniejsze wówczas, gdy strefa rowkowana ma 6 a nie 8 rowków. W warunkach najmniejszej z badanych szybkości ślimaka, zastosowanie strefy rowkowanej powoduje wyraźne zmniejszenie jednostkowego zużycia energii, przy większych szybkościach ślimaka jednostkowe zużycie energii po zastosowaniu strefy rowkowanej jest nieznacznie większe niż w układzie ze strefą bez rowków.

– Na podstawie oznaczeń wybranych właściwości otrzymanej wytłoczyny i tworzywa przetwarzanego, można przyjąć ogólnie, że w przetwarzanym tworzywie nie nastąpiły niekorzystne zmiany, zwłaszcza cech przetwórczych.

Uzupełnieniem i rozwinięciem prezentowanych badań będzie, znajdująca się w przygotowaniu, IV część pracy, zatytułowana „Porównanie funkcjonowania modelu wytłaczarki z jej prototypem”. Jej przedmiotem jest prototyp wytłaczarki W-45, w którym zastosowano udoskonalone rozwiązania konstrukcyjne, m.in. tulei obrotowej cylindra, strefy rowkowanej cylindra i ślimaka przetwórczego.

Autor dziękuje prof. dr. hab. inż. Januszowi Sikorze za konsultacje w zakresie budowy, działania i stosowania strefy rowkowanej cylindra, a Instytutowi Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu za przygotowanie stanowiska badawczego oraz pomoc przy badaniach.

LITERATURA

1. Kowalska B.: *Kunst. Plast. Eur.* 2000, **90**, 10.
2. Praca zbiorowa: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne” (red. Sikora R.), Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
3. Rauwendaal Ch., Sikora J. W.: *Inter. Polym. Proc.* 2000, **15**, 133.
4. Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wytłaczarki”, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
5. Sikora J. W.: *Polimery* 2006, **51**, 285.
6. Sikora J. W.: *Przetwórstwo tworzyw* 2006, **2**, 53.
7. Stasiek J.: „Wytłaczanie tworzyw polimerowych. Zagadnienia wybrane”, Wydawnictwo Uniwersytetu Techniczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2007.
8. White J. L., Potente H.: „Screw Extrusion”, Carl Hanser Verlag, Munich 2003.
9. <http://www.basellorlen.pl>
10. Sasimowski E.: *Polimery* 2011, **56**, 44.
11. *Pat. pol.* 208 838 (2005).
12. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Adv. Polym. Technol.* 2005, **24**, 21.
13. Dobosz M.: „Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.

Otrzymano 19 IX 2011 r.