

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. II. UKSZTAŁTOWANIE POWIERZCHNI WEWNĘTRZNEJ TULEI OBROTOWEJ CYLINDRA^{*)}

Streszczenie — Określano wpływ zastosowania, w układzie uplastyczniającym jednoślismakowym, tulei obrotowej cylindra o różnie ukształtowanej powierzchni wewnętrznej (jednolitej geometrycznie walcowej, z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym lub z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym) na przebieg procesu wytłaczania polietylenu małej gęstości (PE-LD). Badania realizowano na specjalnym stanowisku badawczym, wyposażonym w wyłaczarkę z cylindrem umożliwiającym wymianę tulei obrotowej cylindra. Przeprowadzono pomiary wybranych czynników charakteryzujących proces wytłaczania, określanych bezpośrednio i pośrednio. Stwierdzono, że ukształtowanie powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej cylindra w sposób znaczący wpływa na efektywność jej oddziaływania na przebieg procesu wytłaczania.

Słowa kluczowe: wytłaczanie, tuleja obrotowa cylindra, właściwości wytłoczyny, polietylen małej gęstości.

STUDIES IN THE EFFECTIVENESS OF A NEW GENERATION EXTRUDER. PART II. THE SHAPE OF THE INNER SURFACE OF THE BARREL ROTATING SLEEVE

Summary — The study comprised the determination of the effect of application of the rotating sleeve of the barrel with the inner surfaces: geometrically uniform cylindrical as well as containing rectilinear or helical grooves with triangular cross section, on the selected parameters of the extrusion process in the single screw plasticizing system (Fig. 2). Research was conducted on a special test stand equipped with the extruder with replaceable rotating sleeve of the barrel. During the extrusion of low-density polyethylene the selected parameters characterizing the extrusion process were determined by direct and indirect methods. It was found that the shape of the inner surface of the rotating sleeve of the barrel has a significant impact on the effectiveness of its influence on the course of the extrusion process.

Keywords: extrusion, rotating sleeve of the barrel, properties of the extrudate, low-density polyethylene.

W pierwszej części pracy [1], zbadano wpływ umiejscowienia tulei obrotowej cylindra w układzie uplastyczniającym na charakterystykę procesu wytłaczania. Ustalono, że korzystne oddziaływanie tulei obrotowej na przebieg procesu występuje tylko w przypadku umiejscowienia jej w strefie układu uplastyczniającego, w której współdziała ona z ciągłym kanałem śrubowym ślimaka, płytkim o stałej głębokości.

^{*)} Artykuł stanowi rozszerzenie treści referatu przedstawionego w ramach XV Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Międzyzdroje — Kopenhaga, 14–17 czerwca 2010 r.

Dążąc do dalszego zwiększenia wydajności wytłaczania przy jak najmniejszym zużyciu energii, układ uplastyczniający wyłaczarki nowej generacji poddano kolejnym udoskonaleniom. Biorąc pod uwagę zamieszczone w [1] wyniki pomiarów i sformułowane na ich podstawie wnioski, ślimak klasyczny zastąpiono ślimakiem specjalnym, skonstruowanym do współpracy z tuleją obrotową cylindra, zastosowano także nowe rozwiązania konstrukcyjne dotyczące ukształtowania wewnętrznej powierzchni tej tulei. Prezentowana praca miała na celu określenie wpływu ukształtowania powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej cylindra oraz zmian szybkości jej obrotów na wybrane charakterystyki procesu wytłaczania.

Badania obejmowały, prowadzone podczas procesu wytłaczania polietylenu małej gęstości, pomiary wartości wybranych czynników określonych bezpośrednio i wyznaczeniu na ich podstawie wielkości charakteryzujących ten proces.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

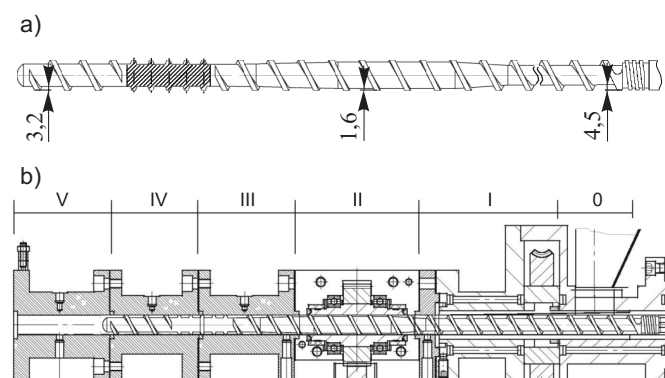
Do badań użyto polietylenu małej gęstości o nazwie handlowej Malen E i symbolu FG NX 23-D006, wyprodukowanego w postaci granulatu przez firmę Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o. [2].

Stanowisko badawcze

Wykorzystane w badaniach, specjalne stanowisko badawcze, wyposażone w wytlaczarkę z układem uplastyczniającym nowej konstrukcji [3–6], opisano w Cz. I [1]. Na potrzeby niniejszych badań układ uplastyczniający został poddany następującym modyfikacjom: ślimak klasyczny zastąpiono ślimakiem specjalnym (rys. 1a) o średnicy $D = 25$ mm i stosunku $L/D = 24$, skonstruowanym do współpracy z tuleją obrotową cylindra, przystosowanym do przetwórstwa polietylenu małej gęstości. Segment z tuleją obrotową cylindra, zgodnie z wnioskami sformułowanymi w [1], umieszczono w II-giej strefie grzejnej (rys. 1b), dzięki temu tuleja obrotowa współpracowała z ciągłym kanałem śrubowym ślimaka, płytkim o stałej głębokości.

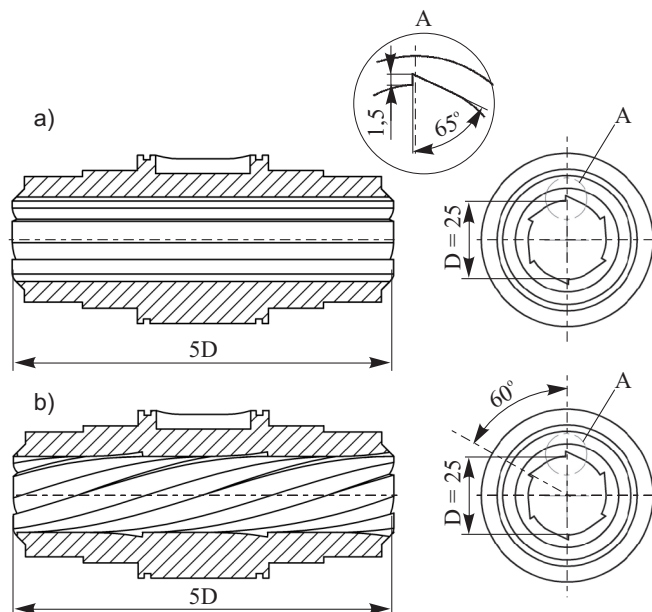
Trzy stosowane tuleje obrotowe cylindra o długości $5D$, z otworem wewnętrznym takim samym, jak w pozostałych częściach składowych cylindra, miały następujące powierzchnie wewnętrzne:

- jednolitą geometrycznie, walcową bez rowków,



Rys. 1. Schemat: a) ślimaka specjalnego, b) układu uplastyczniającego wyposażonego w tuleję obrotową cylindra z zaznaczonym podziałem na strefy grzejne 0–V

Fig. 1. Scheme of the a) special screw, b) plasticizing system equipped with rotating sleeve of the barrel indicating the partitioning into heating zones 0–V



Rys. 2. Tuleja obrotowa cylindra: a) z 6. rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, b) z 6. rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym, każdy o kącie skrzywienia 73°

Fig. 2. The rotating sleeve of the barrel with a) 6 rectilinear grooves, b) 6 helical grooves, with triangular cross section and torsion angle of 73°

- z 6. rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, każdy o głębokości 1,5 mm oraz kącie wierzchołkowym zawartym pomiędzy płaszczyznami tworzącymi rowek, wynoszącym 65° (rys. 2a),

- z 6. rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym (rys. 2b).

Kształt i wymiary rowków na powierzchni wewnętrznej tulei obrotowych cylindra wykonano według koncepcji własnej autora.

Program badań

Aby umożliwić porównanie wyników, do badań użyto takiego samego jak w Cz. I tworzywa a także zadano taką samą wartość temperatury nastawianej w poszczególnych strefach układu uplastyczniającego wytlaczarki.

Wartość ta, dobrana na podstawie literatury [7–10] oraz doświadczeń własnych [11, 12], wynosiła w poszczególnych strefach, odpowiednio, $T_I = 80^\circ\text{C}$, $T_{II} = 160^\circ\text{C}$, $T_{III} = 170^\circ\text{C}$, $T_{IV} = 180^\circ\text{C}$, $T_V = 175^\circ\text{C}$, temperatura głowicy wytłaczarskiej $T_{VI} = 165^\circ\text{C}$ oraz $T_{VII} = 165^\circ\text{C}$. W chłodzonej wodą strefie zasypu ustalono temperaturę $T_0 = 40^\circ\text{C}$. Pomiary czynników określanych bezpośrednio przeprowadzono w warunkach szybkości ślimaka $n_s = 1,67; 3,33; 5,00; 6,67$ lub $8,33\text{ s}^{-1}$, gdy każda z trzech badanych tulei obrotowych była nieruchoma oraz wówczas gdy wykonywała ruch obrotowy w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, z szybkością $n_c = 0,83; 1,66; 2,50$ lub $3,33\text{ s}^{-1}$. Każdorazowo po zmianie warunków wytłaczania, a przed przystąpieniem do pomiarów,

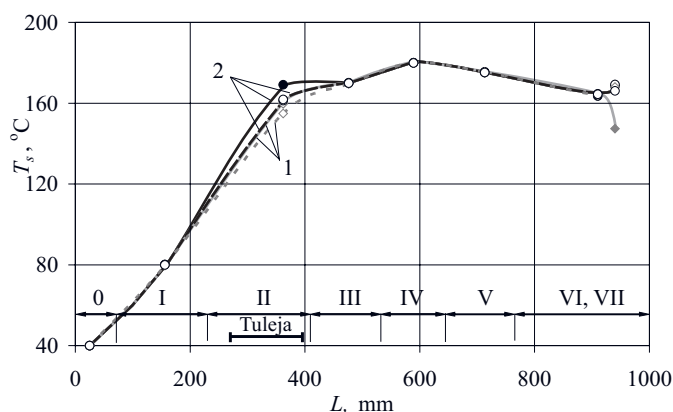
stabilizowano proces, co w stopniu zadowalającym, w większości przypadków następowało po upływie ok. 15 min. Jeśli po upływie tego czasu obserwowano dalsze zachodzące zmiany rozkładu temperatury układu uplastyczniającego, to czas stabilizacji wydłużano, odpowiednio, do 20–30 min.

Oznaczone czynniki charakteryzujące badany proces wytłaczania, metody badań, jak również określane właściwości otrzymanej wytłoczyny, były takie same, jak w Cz. I [1].

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

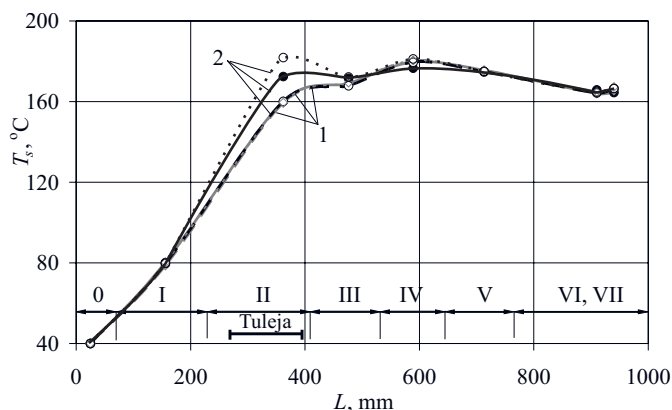
Temperatura ścianki cylindra

Przebieg zmian temperatury ścianki cylindra oraz głowicy wytłaczarskiej, w funkcji ich długości, w warunkach zmiennej szybkości obrotów tulei obrotowej cylindra, w odniesieniu do trzech badanych rozwiązań ukształtowania jej powierzchni wewnętrznej, przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Zastosowana szybkość ślimaka wynosiła, odpowiednio, $n_s = 1,67 \text{ s}^{-1}$ oraz $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 3. Temperatura (T_s) ścianki cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej 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 wytłaczarskiej, linie ciągłe – tuleja obrotowa jednorodnie walcowa, linie przerywane kreskowe – tuleja obrotowa z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, linie przerywane punktowe – tuleja obrotowa z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym

Fig. 3. Temperature (T_s) of the barrel wall of the plasticizing system and the extruder head versus their length (L); screw speed (n_s) = $1,67 \text{ s}^{-1}$, barrel sleeve rotation speed (n_c): 1 – $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 – $3,33 \text{ s}^{-1}$, 0–V – heating zones of the plasticizing system, VI, VII – heating zones of the extruder head, solid lines – rotating sleeve with geometrically uniform cylinder, dashed lines – rotating sleeve with rectilinear grooves of triangular cross section, dashed point lines – rotating sleeve with helical grooves of triangular cross section



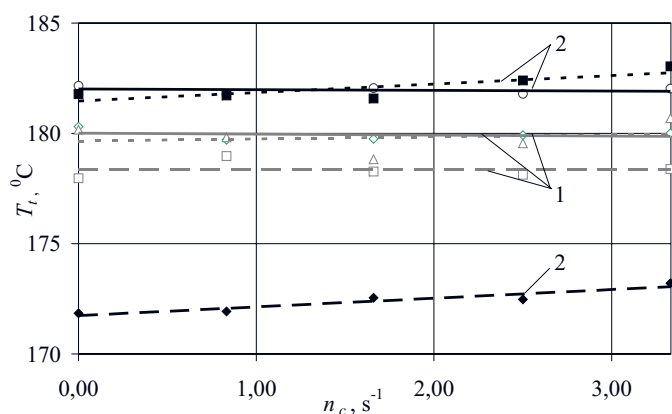
Rys. 4. Temperatura (T_s) ścianki cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej w funkcji ich długości (L); szybkość ślimaka (n_s) = $8,33 \text{ s}^{-1}$; szybkość tulei obrotowej cylindra (n_c): 1 – $0,0 \text{ s}^{-1}$, 2 – $3,33 \text{ s}^{-1}$, pozostałe oznaczenia por. rys. 3
Fig. 4. Temperature (T_s) of the barrel wall of the plasticizing system and the extruder head versus 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

Gdy tuleje obrotowe cylindra pozostawały nieruchome a obracał się tylko ślimak, wówczas temperatura ścianki cylindra i głowicy wytłaczarskiej utrzymywała się na zadanym, wstępnie poziomem. Wprawienie w ruch tulei obrotowych cylindra powodowało wzrost temperatury ścianki cylindra w II strefie grzejnej, w której były one umieszczone. Ogólny charakter zmian rozkładu temperatury ścianki cylindra i głowicy wytłaczarskiej, w następstwie oddziaływania tulei obrotowej, jest podobny w przypadku wszystkich badanych szybkości ślimaka, intensywność tych zmian zależy natomiast od wartości szybkości zarówno tulei obrotowej, jak i ślimaka.

W warunkach najmniejszej wartości szybkości ślimaka $n_s = 1,67 \text{ s}^{-1}$ (rys. 3), wzrost temperatury ścianki w wyniku oddziaływania tulei obrotowej obracającej się z szybkością $3,33 \text{ s}^{-1}$ był wyraźny tylko wtedy, gdy zastosowano tuleję jednorodnie walcową i wyniósł $9 \text{ }^\circ\text{C}$ powyżej wartości zadanej. W przypadku największej szybkości ślimaka $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$ (rys. 4) i zastosowanej tulei jednorodnie walcowej następuje wzrost temperatury ścianki o $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Większy wzrost wartości T_s był obserwowany wówczas, gdy wykorzystano tuleję z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym i wyniósł $22 \text{ }^\circ\text{C}$ powyżej wartości zadanej. Przyczyną tego zjawiska jest ciepło tarcia wewnętrznego generowane bezpośrednio w tworzywie przetwarzanym, zwiększające się wraz ze względną szybkością ślimaka i tulei obrotowej, obracających się w kierunkach przeciwnych. Efektem oddziaływania tulei obrotowych jest występowanie miejscowej autotermiczności procesu wytłaczania [13, 14].

Temperatura tworzywa przetwarzanego

Przeprowadzone pomiary nie wykazały wpływu zmian (w badanym zakresie) szybkości tulei obrotowej



Rys. 5. Temperatura (T_t) tworzywa przetwarzanego 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 por. rys. 3

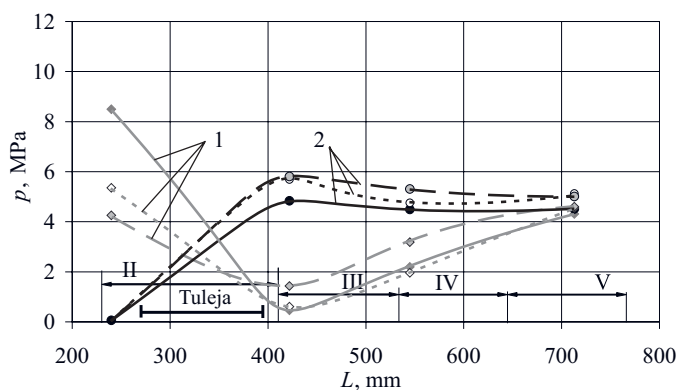
Fig. 5. Temperature (T_t) of the polymer processed in the flow channel before the extrusion head versus the barrel sleeve rotation speed (n_c), for increasing screw rotation speed (n_s): 1 — $1,67\text{ s}^{-1}$, 2 — $8,33\text{ s}^{-1}$, line designations as in Fig. 3

na, mierzona w kanale przepływowym przed głowicą wytłaczarską, temperaturę tworzywa przetwarzanego (rys. 5). Wpływ szybkości ślimaka na temperaturę tworzywa przetwarzanego także nie był znaczący. W warunkach szybkości ślimaka $n_s = 1,67\text{ s}^{-1}$ i zastosowanej tulei jednolitej geometrycznie walcowej bądź tulei z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym, temperatura tworzywa w kanale przepływowym wynosiła $180\text{ }^\circ\text{C}$, a zwiększenie wartości n_s do $8,33\text{ s}^{-1}$ spowodowało wzrost T_t jedynie o $2\text{ }^\circ\text{C}$.

Zastosowanie natomiast w układzie uplastyczniającym tulei obrotowej z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym wpłynęło na obniżenie do $178\text{ }^\circ\text{C}$ temperatury tworzywa w przypadku, gdy szybkość ślimaka $n_s = 1,67\text{ s}^{-1}$ i do $172\text{ }^\circ\text{C}$ w przypadku, gdy $n_s = 8,33\text{ s}^{-1}$. Przyczyną tego zjawiska może być znaczne skrócenie czasu przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym, w wyniku zwiększenia natężenia przepływu tworzywa przetwarzanego uzyskanego dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania konstrukcyjnego tulei.

Ciśnienie tworzywa

Różny przebieg zmian ciśnienia tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego zaobserwowano już wówczas, gdy badane tuleje obrotowe cylindra były nieruchome. Największe ciśnienie tworzywa ($8,5\text{ MPa}$) przed tuleją obrotową zanotowano w przypadku zastosowania tulei o powierzchni wewnętrznej jednolitej geometrycznie walcowej (szybkość ślimaka $1,67\text{ s}^{-1}$). Użycie tulei z rowkami śrubowymi lub tulei z rowkami prostoliniowymi skutkowało niższym ciśnieniem w tym punkcie pomiarowym, wynoszącym, odpowiednio $5,4$ i $4,3\text{ MPa}$. Z kolei



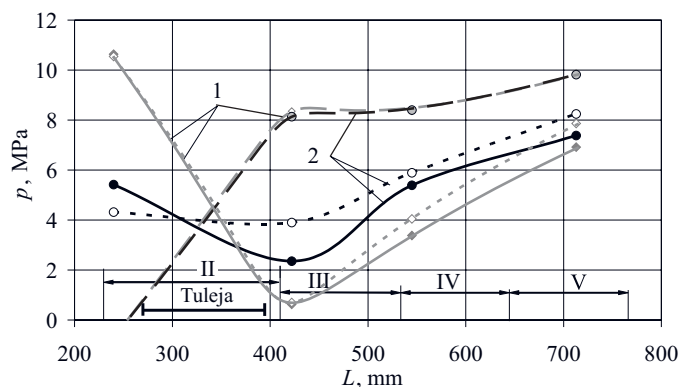
Rys. 6. Ciśnienie tworzywa (p) w funkcji długości układu uplastyczniającego (L); szybkość ślimaka (n_s) = $1,67\text{ s}^{-1}$, szybkość tulei obrotowej cylindra (n_c): 1 — $0,0\text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33\text{ s}^{-1}$, oznaczenia linii por. rys. 3

Fig. 6. Polymer pressure (p) versus 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 — $3,33\text{ s}^{-1}$, line designations as in Fig. 3

bezpośrednio za tuleją obrotową najniższe ciśnienie uzyskano w przypadku użycia tulei jednolitej geometrycznie walcowej ($0,5\text{ MPa}$), najwyższe zaś ($1,5\text{ MPa}$) — tulei z rowkami prostoliniowymi.

Wprawienie tulei cylindra w ruch obrotowy, o kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, powoduje diametralną zmianę rozkładu ciśnienia tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego, ciśnienie tworzywa mierzone przed tuleją znacznie się obniża, za nią natomiast rośnie. Maksymalne zmiany ciśnienia tworzywa wystąpiły w warunkach największej z badanych szybkości tulei obrotowej, wynoszącej $3,33\text{ s}^{-1}$. Ciśnienie tworzywa mierzone bezpośrednio przed tuleją, gdy szybkość ślimaka wynosiła $1,67\text{ s}^{-1}$, było bliskie zeru w odniesieniu do wszystkich trzech badanych ukształtowań tulei (rys. 6). Bezpośrednio za tuleją obrotową natomiast wartość ciśnienia w takich warunkach była większa o ponad $4,3\text{ MPa}$ w przypadku tulei jednolitej geometrycznie walcowej i tulei z rowkami prostoliniowymi oraz o $5,1\text{ MPa}$ — tulei z rowkami śrubowymi. Najwyższą wartość ciśnienia $5,8\text{ MPa}$ uzyskano stosując tuleję z rowkami prostoliniowymi. W następnych punktach pomiarowych następowało obniżenie ciśnienia, ale jego wartość nadal była większa niż wówczas, gdy tuleje były nieruchome. We wszystkich punktach pomiarowych ciśnienie tworzywa w przypadku zastosowania tulei z rowkami prostoliniowymi było najwyższe. Bezpośrednio przed głowicą wytłaczarską wartości ciśnienia tworzywa były zbliżone.

Natomiast przy największej badanej szybkości ślimaka $8,33\text{ s}^{-1}$, wprawienie w ruch obrotowy i zwiększanie szybkości tulei z rowkami prostoliniowymi nie wywierało wpływu na rozkład ciśnienia tworzywa przetwarzanego wzdłuż układu uplastyczniającego (rys. 7). Niezależnie od szybkości tej tulei, przy największej badanej szyb-



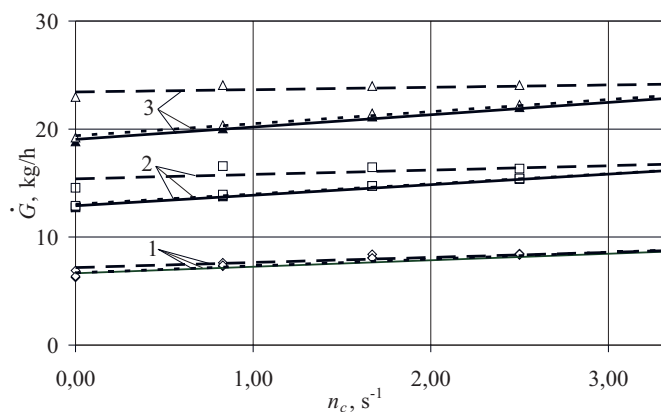
Rys. 7. Ciśnienie (p) tworzywa w funkcji długości (L) układu uplastyczniającego; szybkość ślimaka (n_s) = 8,33 s⁻¹, szybkość tulei obrotowej cylindra (n_c): 1 – 0,0 s⁻¹, 2 – 3,33 s⁻¹, oznaczenia linii por. rys. 3

Fig. 7. Polymer pressure (p) versus the length of the plasticizing system (L); screw speed (n_s) = 8,33 s⁻¹, barrel sleeve rotation speed (n_c): 1 – 0,0 s⁻¹, 2 – 3,33 s⁻¹, line designations as in Fig. 3

kości ślimaka 8,33 s⁻¹, ciśnienie tworzywa przed tuleją przyjmowało wartości bliskie zeru, natomiast za tuleją ponad 8 MPa, a przed głowicą wytłaczarską prawie 10 MPa, uzyskując najwyższe wartości spośród porównywanych tulei. W przypadku pozostałych dwóch badanych tulei, charakter zmian ciśnienia tworzywa, wynikających ze zwiększania szybkości obrotów tulei, był taki, jak w warunkach najmniejszej szybkości ślimaka $n_s = 1,67$ s⁻¹. Na skutek oddziaływania tulei jednolitej geometrycznie walcowej, obracającej się z szybkością 3,33 s⁻¹, ciśnienie tworzywa przed tuleją z 10,6 MPa obniżyło się o 5,2 MPa oraz o 6,2 MPa w efekcie oddziaływań tulei z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym. Podobnie, jak poprzednio, następował wzrost ciśnienia tworzywa bezpośrednio za tuleją obrotową oraz w kolejnych punktach pomiarowych, w kierunku głowicy wytłaczarskiej o, odpowiednio, 1,7; 2,0 oraz 0,5 MPa w przypadku tulei jednolitej geometrycznie walcowej i 3,2; 1,8 oraz 0,4 MPa – tulei z rowkami śrubowymi. Tym razem, bezpośrednio przed głowicą wytłaczarską, w zależności od zastosowanej tulei, wartość ciśnienia tworzywa była bardziej zróżnicowana ($\Delta p_{maks.} = 2,9$ MPa). Nadal jednak wyższa wartość odnosiła się do obracającej się tulei obrotowej cylindra.

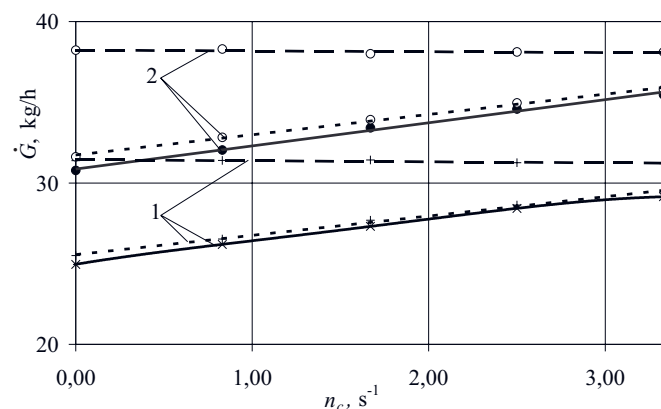
Natężenie przepływu tworzywa

Zaobserwowano proporcjonalne zwiększanie się masywnego natężenia przepływu tworzywa (\dot{G}), wraz ze wzrostem szybkości tulei zarówno o powierzchni wewnętrznej jednolitej geometrycznie walcowej, jak i z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym (rys. 8, 9). Pierwsza z tych tulei, obracając się z największą szybkością 3,33 s⁻¹, powoduje wzrost masywnego natężenia przepływu o 31,9; 25,6; 20,0; 16,8 oraz 15,2 %, odpowiednio,



Rys. 8. Masowe natężenie przepływu (\dot{G}) tworzywa w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c); szybkość ślimaka (n_s): 1 – 1,67 s⁻¹, 2 – 3,33 s⁻¹, 3 – 5,00 s⁻¹, oznaczenia linii por. rys. 3

Fig. 8. Polymer mass flow rate (\dot{G}) versus the barrel sleeve rotation speed (n_c); screw speed (n_s): 1 – 1,67 s⁻¹, 2 – 3,33 s⁻¹, 3 – 5,00 s⁻¹, line designations as in Fig. 3



Rys. 9. Masowe natężenie przepływu (\dot{G}) tworzywa w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c); szybkość ślimaka (n_s): 1 – 6,67 s⁻¹, 2 – 8,33 s⁻¹, oznaczenia linii por. rys. 3

Fig. 9. Polymer mass flow rate (\dot{G}) versus the barrel sleeve rotation speed (n_c); screw speed (n_s): 1 – 6,67 s⁻¹, 2 – 8,33 s⁻¹, line designations as in Fig. 3

w warunkach kolejno wzrastających szybkości ślimaka. W przypadku natomiast zastosowania tulei z rowkami śrubowymi zwiększenie masywnego natężenia przepływu wynosi, odpowiednio, 33,3; 24,4; 19,3; 15,4 oraz 13,2 %. W warunkach największej z badanych szybkości $n_c = 3,33$ s⁻¹ oraz największej szybkości ślimaka $n_s = 8,33$ s⁻¹ uzyskane maksymalne natężenie przepływu wynosiło, odpowiednio, 35,5 kg/h – tuleja o powierzchni wewnętrznej jednolitej geometrycznie walcowej oraz 35,8 kg/h – tuleja z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym. Wartości te były jednak mniejsze niż obserwowane w przypadku zastosowania tulei obrotowej z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym.

Odnotowano wprawdzie mały wpływ szybkości obrotowej tej tulei na masywność natężenie przepływu tworzywa

wa, jednak już samo jej umieszczenie w układzie uplastyczniającym prowadziło do zwiększenia wydajności. Natężenie przepływu w warunkach największej szybkości ślimaka $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$ niezależnie od szybkości tej tulei wynosiło średnio 38,2 kg/h.

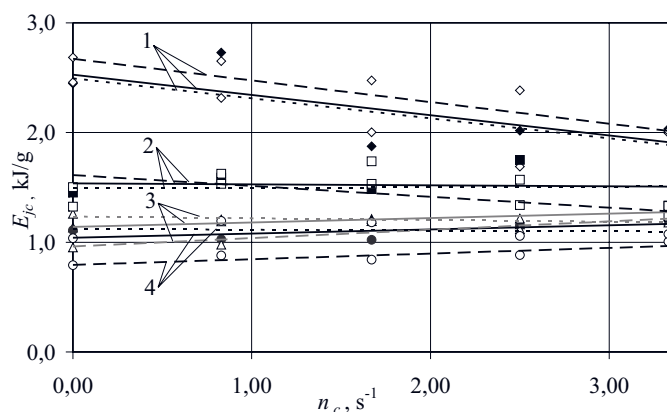
Na uwagę zasługuje fakt, że zastosowanie ślimaka specjalnego, skonstruowanego do współpracy z tuleją obrotową cylindra, w całym badanym zakresie szybkości zarówno ślimaka, jak i tulei obrotowych, spowodowało znaczny wzrost masowego natężenia przepływu w stosunku do wartości \dot{G} uzyskanych poprzednio [1] przy użyciu ślimaka klasycznego. W przypadku umieszczonej w II strefie układu uplastyczniającego, nieruchomej tulei z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, wzrost ten wyniósł, odpowiednio, 34,3; 43,0; 50,3; 55,4 oraz 53,4 % w warunkach kolejnych, badanych szybkości ślimaka.

Jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki

Zależność jednostkowego zużycia energii E_{jc} od szybkości tulei obrotowej cylindra o trzech różnych rozwiązaniach ukształtowania jej powierzchni wewnętrznej przedstawiono na rys. 10.

Wykorzystanie ślimaka specjalnego pozwoliło na ograniczenie jednostkowego zużycia energii w porównaniu ze zużyciem w warunkach zastosowania ślimaka klasycznego [1]. Otrzymane wartości E_{jc} malały wraz ze wzrostem szybkości ślimaka wówczas, gdy umieszczona w układzie uplastyczniającym tuleja pozostawała nieruchoma.

Zastosowanie tulei z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym skutkowało obniżeniem E_{jc} maksymalnie o 0,69 kJ/g (26 %), użycie tulei z rowkami śrubo-



Rys. 10. Jednostkowe zużycie energii całkowitej doprowadzanej do wylączarki (E_{jc}) w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c); szybkość ślimaka (n_s): 1 – $1,67 \text{ s}^{-1}$, 2 – $3,33 \text{ s}^{-1}$, 3 – $5,00 \text{ s}^{-1}$, 4 – $8,33 \text{ s}^{-1}$, oznaczenia linii por. rys. 3

Fig. 10. Specific total energy consumption by the extruder (E_{jc}) versus the barrel sleeve speed (n_c); screw speed (n_s): 1 – $1,67 \text{ s}^{-1}$, 2 – $3,33 \text{ s}^{-1}$, 3 – $5,00 \text{ s}^{-1}$, 4 – $8,33 \text{ s}^{-1}$, line designations as in Fig. 3

wymi – obniżeniem o 0,45 kJ/g (18 %), natomiast tulei jednolitej geometrycznie walcowej – o 0,41 kJ/g (17 %) (szybkość ślimaka $1,67 \text{ s}^{-1}$). W warunkach większych szybkości ślimaka jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki, nie zmienia się lub obserwowany jest jego niewielki wzrost wraz ze zwiększaniem szybkości badanych tulei obrotowych cylindra.

Rosnąca szybkość obrotów ślimaka wpływa na zmniejszenie jednostkowego zużycia energii na skutek przeważającego wzrostu natężenia przepływu tworzywa w porównaniu ze wzrostem strumienia doprowadzanej energii. W wyniku pięciokrotnego zwiększenia szybkości ślimaka z $1,67$ do $8,33 \text{ s}^{-1}$, w warunkach nieruchomej tulei obrotowej cylindra z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, wartość E_{jc} zmniejszyła się o 70 % i wyniosła 0,79 kJ/g. Wprawienie tej tulei w ruch obrotowy i stopniowe zwiększanie szybkości obrotów powodowało wzrost jednostkowego zużycia energii do 1,0 kJ/g, będący następstwem zwiększającej się mocy, doprowadzanej do układu napędowego tulei obrotowej i niezmiennego masowego natężenia przepływu tworzywa.

W przypadku zastosowania tulei o powierzchni wewnętrznej jednolitej geometrycznie walcowej bądź tulei z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym, w warunkach ich największej z badanych szybkości ($n_c = 3,33 \text{ s}^{-1}$) oraz największej szybkości ślimaka $n_s = 8,33 \text{ s}^{-1}$, wartość E_{jc} wyniosła, odpowiednio, 1,20 kJ/g oraz 1,07 kJ/g.

Masowy wskaźnik szybkości płynięcia

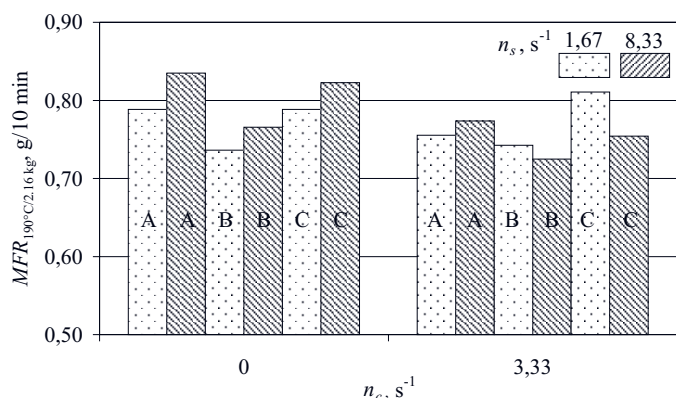
Zróżnicowanie średnich wartości masowego wskaźnika szybkości płynięcia $MFR_{190 \text{ °C}/2,16 \text{ kg}}$ próbek tworzywa pobranych z otrzymanej wytłoczyny, było niewielkie (rys. 11). Obliczona średnia arytmetyczna wartości MFR wszystkich badanych próbek wyniosła 0,775 g/10 min a odchylenie standardowe tylko 0,035.

W celach porównawczych wykonano także pomiary MFR 10 próbek granulatu, pobranych losowo z całej partii tworzywa przetwarzanego. Otrzymana średnia wyniosła $0,787 \pm 0,002 \text{ g/10 min}$ z odchyleniem standardowym 0,005 g/10 min, można stwierdzić zatem, że w przetwarzanym tworzywie w wyniku przetworstwa nie nastąpiły niekorzystne zmiany.

Wytrzymałość na rozciąganie

Na rys. 12 przedstawiono zmienność średnich wartości wytrzymałości na rozciąganie (σ) i związanych z nimi odchylen standardowych, próbek wyciętych za pomocą wykrojnika z wytłoczyny otrzymanej w skrajnych warunkach szybkości ślimaka i tulei obrotowej cylindra, o powierzchni wewnętrznej jednolitej geometrycznie walcowej lub z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym.

Przeprowadzona analiza wariancji ANOVA [15], nie wykazała istotnego wpływu ukształtowania powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej cylindra na wytrzyma-



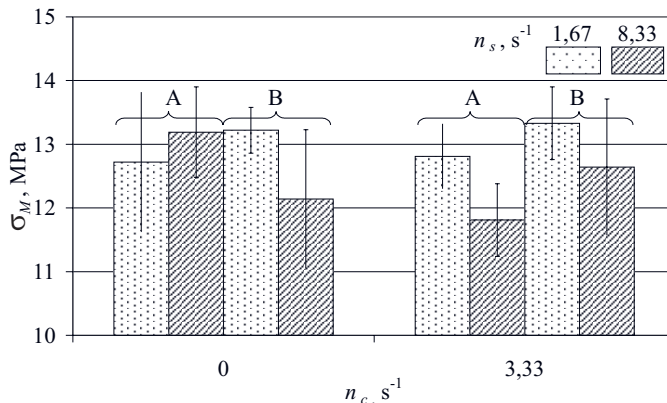
Rys. 11. Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (MFR) wytłoczyny wytworzonej w skrajnych warunkach szybkości ślimaka (n_s) oraz szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), o powierzchni wewnętrznej: a) — jednolitej geometrycznie walcowej, b) — z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, c) — z rowkami śrubowymi o przekroju trójkątnym

Fig. 11. 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) with an inner surface: a) geometrically uniform cylinder, b) with rectilinear grooves of triangular cross section, c) with helical grooves of triangular cross section

łość próbek otrzymanej wytłoczyny. Istotny statystycznie ($p = 0,026406$) okazał się natomiast wpływ szybkości obrotowej ślimaka. Wykonany test *post-hoc* Tukeya nie wskazał istotności różnic porównywanych par średnich. Należy podkreślić, że zastosowanie badanych tulei, obracających się z największą szybkością (korzystne pod względem zarówno natężenia przepływu, jak i jednostkowego zużycia energii), nie powoduje istotnego pogorszenia wytrzymałości na rozciąganie wytworzonej wytłoczyny.

PODSUMOWANIE

Stwierdzono, że ukształtowanie powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej ma decydujący wpływ na przebieg procesu wytłaczania. Największe w badanych warunkach masowe natężenie przepływu tworzywa oraz, równocześnie, najmniejsze jednostkowe zużycie energii uzyskano w przypadku zastosowania tulei obrotowej z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym. Przy dużej szybkości ślimaka zwiększanie szybkości takiej tulei obrotowej nie powoduje jednak wzrostu natężenia przepływu tworzywa. Prawdopodobnie jest to wynikiem ograniczonego przepływu tworzywa przez, poprzedzające tuleję obrotową, strefy funkcjonalne układu uplastyczniającego. Uzupełnieniem zatem i rozwinięciem prezentowanych badań są, znajdujące się w przygotowaniu: Cz. III. pracy zatytułowana „Współdziałanie tulei obrotowej z aktywną strefą rowkowaną cylindra” oraz Cz. IV. „Porównanie funkcjonowania modelu wytłaczarki z jej prototypem”.



Rys. 12. Wytrzymałość na rozciąganie (σ_M) wytłoczyny wytworzonej w skrajnych warunkach szybkości ślimaka (n_s) oraz szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), o powierzchni wewnętrznej: a) — jednolitej geometrycznie walcowej, b) — z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym

Fig. 12. Tensile strength (σ_M) of extrudates processed at the lowest and highest values of the screw speed (n_s) and the barrel sleeve rotation speed (n_c) with an inner surface: a) geometrically uniform cylinder, b) with rectilinear grooves of triangular cross section

Autor dziękuje Instytutowi Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu za przygotowanie stanowiska badawczego oraz pomoc przy badaniach.

LITERATURA

1. Sasimowski E.: *Polimery* 2011, **56**, 44.
2. Strona internetowa www.basellorlen.pl
3. Zgłosz. pat. P-385 054 (2008).
4. Pat. pol. 185 728 (2003).
5. Zgłosz. pat. P-386 646 (2008).
6. Sikora R., Sasimowski E., Sikora J. W.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2010, **136**, 206.
7. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
8. Praca zbiorowa: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych, podstawy logiczne, formalne i terminologiczne” (red. Sikora R.), Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
9. White J. L., Potente H.: „Screw extrusion”, Carl Hanser Verlag, München 2003.
10. Hansen F., Knappe W., Potente H.: „Handbuch der Kunststoffe — Extrusionstechnik. II Extrusionsanlagen”, Carl Hanser Verlag, München — Wien 1986.
11. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Kunstst. Int.* 2006, **9**, 89.
12. Sasimowski E.: *Polimery* 2008, **53**, 47.
13. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Adv. Polym. Technol.* 2005, **24**, 21.
14. Rauwendaal Ch., Sikora J. W.: *Int. Polym. Proc.* 2000, **15**, 133.
15. Dobosz M.: „Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.

Otrzymano 21 III 2011 r.