

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. IV. PORÓWNANIE FUNKCJONOWANIA MODELU WYŁACZARKI I JEJ PROTOTYPU

Streszczenie — Porównano funkcjonowanie prototypu jednoślindakowej wyłaczarki nowej generacji W-45 i jej modelu W-25. W prototypie wyłaczarki zastosowano udoskonalone rozwiązanie konstrukcyjne układu uplastyczniającego, obejmujące wyposażenie go w tuleję obrotową cylindra z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, współdziałającą ze ślimakiem specjalnym w strefie o najmniejszej głębokości kanału śrubowego oraz wyposażenie, zamiennie, w rowkowaną lub jednolitą geometrycznie bez rowków strefę zasypu i zasilania. Podczas wyłaczania za pomocą prototypu W-45 polietylenu małej gęstości, przy zmiennej szybkości ślimaka oraz tulei obrotowej cylindra badano wybrane czynniki charakteryzujące proces. Można przyjąć, że ogólny charakter oddziaływania tulei obrotowej na przebieg procesu wyłaczania, zarówno w modelu W-25, jak i w prototypie W-45 jest taki sam. Stwierdzono, że wprowadzone modyfikacje konstrukcyjne zarówno ślimaka przetwórczego, jak i tulei obrotowej cylindra oraz strefy rowkowanej cylindra łącznie z powiązаныmi z nimi elementami składowymi modelu wyłaczarki, jednoznacznie korzystnie wpłynęły na efektywność oddziaływania tulei obrotowej i przebieg procesu wyłaczania za pomocą prototypu W-45.

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

STUDIES IN THE EFFECTIVENESS OF A NEW GENERATION EXTRUDER. PART IV. THE COMPARISON OF PERFORMANCE OF THE EXTRUDER MODEL WITH ITS PROTOTYPE

Summary — The performance of the prototype of new generation single-screw extruder W-45 was compared to that of its model W-25. In the extruder prototype, an improved construction of the plasticizing system was used, comprising the rotational sleeve of the barrel with rectilinear grooves of triangular section, cooperating with a special screw in the zone of the lowest depth of screw channel and equipped optionally with a grooved or geometrically uniform ungrooved hopper and feeding zone. The selected process parameters were examined during the extrusion of low density polyethylene with W-45 prototype at variable speed of the screw and rotational sleeve of the barrel. It can be assumed that the influence of rotating barrel on the course of extrusion process is of the same general character for both model W-25 and prototype W-45. It was found that the modifications in the construction of processing screw as well as of rotational sleeve and grooved zone of the barrel, including the connected extruder model components had a clearly positive effect on the efficiency of rotating barrel interaction and the course of extrusion process using prototype W-45.

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

Przedstawione w poprzednich częściach pracy^{*)} kompleksowe badania modelu wyłaczarki jednoślindakowej nowej generacji W-25, z tuleją obrotową cylindra oraz strefą rowkowaną cylindra, stały się podstawą do skon-

struowania prototypu W-45 takiego rodzaju wyłaczarki. W prototypie W-45 zastosowano rozwiązanie konstrukcyjne układu uplastyczniającego, które w toku badań modelu, charakteryzowało się największym masowym natężeniem przepływu tworzywa przetwarzanego i najmniejszym jednostkowym zużyciem energii w procesie

^{*)} Polimery 2011, 56, 390. Polimery 2012, 57, 296 i 747.

wytłaczania. Był to układ uplastyczniający wyposażony w: tuleję obrotową cylindra z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, współdziałającą ze ślimakiem specjalnym w strefie o najmniejszej głębokości kanału śrubowego oraz w rowkowaną strefę zasypu i zasilania cylindra.

Ze względu na fakt, że w modelu wytłaczarki jednostkowe zużycie energii w przypadku zastosowania strefy rowkowanej było najmniejsze tylko w warunkach najmniejszej badanej szybkości ślimaka, w warunkach natomiast większych szybkości ślimaka, mniejsze wartości występowały wówczas, gdy zastosowano strefę zasypu i zasilania jednolitą geometrycznie bez rowków, w prototypie zbadano oba rozwiązania. W celu dalszej maksymalizacji wydajności wytłaczania a jednocześnie minimalizacji zużycia energii z zachowaniem właściwej – oczekiwanej jakości wycieczyny, wykorzystane w badanym prototypie wytłaczarki rozwiązanie konstrukcyjne układu uplastyczniającego poddano kolejnym udoskonaleniom. Zmodyfikowano rozwiązanie konstrukcyjne zarówno ślimaka przetwórczego, jak i tulei obrotowej cylindra oraz strefy rowkowanej cylindra łącznie z powiązаныmi z nimi elementami składowymi wytłaczarki, takimi jak: układ nagrzewania i termostowania cylindra, segment cylindra z tuleją obrotową oraz jej układ napędowy.

Celem IV Cz. pracy jest porównanie funkcjonowania modelu wytłaczarki W-25 i jej prototypu W-45 oraz efektów wytłaczania za pomocą obu urządzeń. Dlatego też w omawianych badaniach prototypu pomiary przeprowadzono z zastosowaniem takiego samego rodzaju tworzywa i zakresu, charakteryzujących ten proces czynników, określanych bezpośrednio oraz pośrednio, jak w badaniach modelu wytłaczarki (Cz. I–III). Określano zatem wpływ szybkości ślimaka przetwórczego oraz tulei obrotowej cylindra, a także wybranych elementów geometrycznych powierzchni wewnętrznej tulei w strefie rowkowanej cylindra na charakterystykę procesu wytłaczania przy użyciu wytłaczarki W-45.

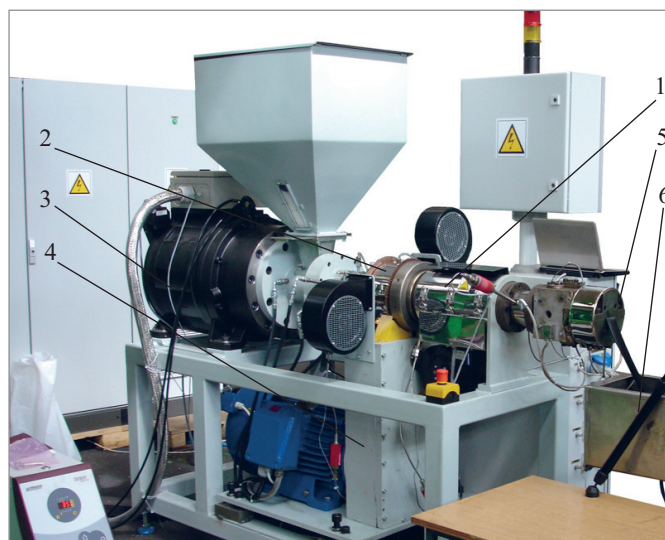
CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

W celu zachowania porównywalności wyników wszystkich części pracy, do badań użyto polietylenu małej gęstości o nazwie handlowej Malen E i symbolu FGX, 23-D006, wyprodukowanego w postaci granulatu przez firmę Basell Orlen Polyolefins S.A. [1].

Stanowisko badawcze

Badania prowadzono na specjalnym stanowisku badawczym, wyposażonym w wytłaczarkę W-45 z układem uplastyczniającym nowej konstrukcji (rys. 1). Stanowisko wykonano w Instytucie Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników w Toruniu, na podstawie

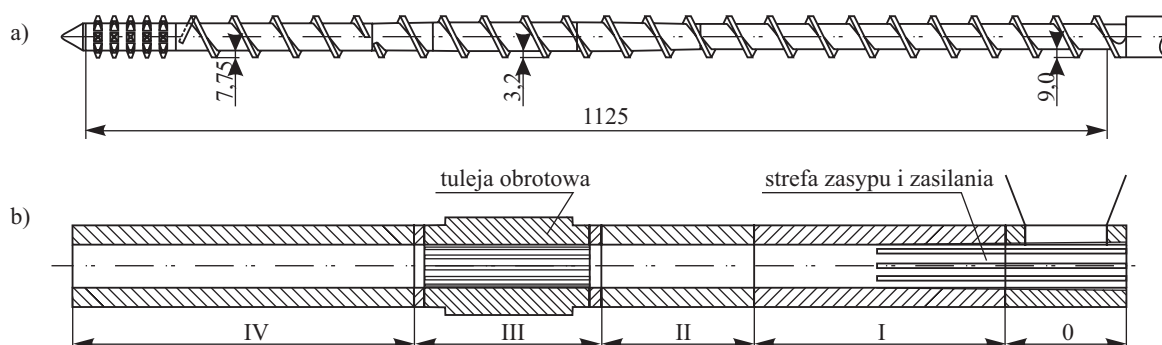


Rys. 1. Część stanowiska badawczego wyposażonego w wytłaczarkę W-45: 1 – układ uplastyczniający, 2 – segment cylindra z tuleją obrotową, 3 – układ napędowy ślimaka, 4 – układ napędowy tulei obrotowej cylindra, 5 – głowica wytłaczarska, 6 – wanna chłodząca wytłoczoną

Fig. 1. Part of the test stand equipped with an extruder W-45: 1 – plasticizing system, 2 – barrel segment with rotating sleeve, 3 – drive system of the screw, 4 – drive system of the rotating sleeve of the barrel, 5 – extruder head, 6 – bath for cooling the extrudate

koncepcji merytorycznej i założeń konstrukcyjnych opracowanych w Katedrze Procesów Polimerowych Politechniki Lubelskiej, z bardzo istotnym udziałem autora niniejszej publikacji.

Stanowisko badawcze było wyposażone w głowicę wytłaczarską z dyszą o przekroju prostokątnym $50 \times 2,9$ mm, używaną także w modelu wytłaczarki, czujniki ciśnienia i temperatury tworzywa przetwarzanego, elektroniczne liczniki energii elektrycznej, zintegrowany z komputerem układ pomiarowy do rejestracji i przetwarzania danych, szafę sterowniczą, termostat wodny, wannę chłodzącą, odciąg wytłoczyny, automatyczną przecinarkę wytłoczyny i inne elementy składowe. W wytłaczarce zastosowano ślimak specjalny (rys. 2) o średnicy $D = 45$ mm i stosunku $L/D = 25$, zaopatrzony na końcu w strefę intensywnego mieszania z 5. poprzeczanymi zwojami poprzecznymi tworzącymi kołki. W stosunku do ślimaka stosowanego w modelu, poza zwiększeniem głębokości kanału śrubowego z zachowaniem takiego samego stopnia redukcji (2,8) jego objętości, wydłużono w kierunku głowicy wytłaczarskiej m.in. strefę zasilania i przemiany, przemieszczając równocześnie strefę sprężania, w której ślimak współdziała z tuleją obrotową oraz strefę intensywnego mieszania. Ślimak był napędzany bezpośrednio za pomocą nowoczesnego silnika elektrycznego wysokomomentowego Baumüller DST 260M54W45-5, o mocy 97 kW, z układem elektronicznym sterowania umożliwiającym bezstopniową regulację jego prędkości obrotowej.



Rys. 2. Schemat a) ślimaka specjalnego, b) cylindra układu uplastyczniającego wyposażonego w tuleję obrotową cylindra z zaznaczonym podziałem na strefy grzejne 0–IV

Fig. 2. Scheme of the a) special screw, b) barrel of the plasticizing system equipped with rotating sleeve of the barrel indicating the partitioning into heating zones 0–IV

W jednym z segmentów stanowiących element budowy cylindra wylączarki, umieszczono tuleję obrotową z otworem wewnętrznym – takim samym, jak w pozostałych częściach składowych cylindra. Zachowano, tak jak w modelu wylączarki, stosunek liczby rowków do średnicy wewnętrznej tulei obrotowej, zwiększono natomiast głębokość rowków, wprowadzono też zaokrąglenie ich krawędzi oraz dna, zmniejszono równocześnie długość tulei do $4D$.

Na powierzchni wewnętrznej tulei obrotowej wykonano 12 rowków prostoliniowych asymetrycznych o przekroju trójkątnym, każdy o głębokości 2 mm oraz kącie wierzchołkowym między płaszczyznami tworzącymi rowek, wynoszącym 65° . Zmieniono także, zgodnie ze zgłoszeniem patentowym [2], rozwiązanie konstrukcyjne segmentu cylindra z tuleją obrotową, na umożliwiające regulację luzu wzdłużnego tulei, z udoskonalonym uszczelnieniem i łożyskowaniem. Tuleję cylindra umieszczono w III strefie układu (rys. 2), gdzie współdziałała z kanałem śrubowym ciągłym ślimaka o najmniejszej głębokości. Na takie korzystne jej umiejscowienie wskazały wyniki pierwszej części pracy.

Tuleja obrotowa cylindra była napędzana poprzez przekładnię redukcyjną za pomocą trójfazowego indukcyjnego silnika elektrycznego (22 kW) z możliwością bezstopniowej regulacji prędkości.

W rowkowanej strefie zasypu i zasilania cylindra stosowano zamiennie tuleję wymienną o powierzchni wewnętrznej jednolitej geometrycznie bez rowków oraz tuleję z 8. rowkami wzdłużnymi. Rowki wewnątrz tulei miały w przekroju poprzecznym kształt trapezu równoramienego, szerokość dna 4,5 mm, szerokość podstawy przeciwległej od strony ślimaka 5 mm, promień zaokrąglenia krawędzi 1 mm oraz zmienną głębokość, największą 1,5 mm na początku strefy zasypu i zmniejszającą się do całkowitego zaniku na długości 250 mm w strefie zasilania. Udoskonalenie tulei rowkowanej polegało na zastosowaniu otworu stożkowego o średnicy wejściowej od strony zasypu 48 mm i średnicy wyjściowej w miejscu zaniku rowków 45 mm. Dodatkowo powierzchnię wewnętrzną tulei wraz z rowkami wypolerowano a krawę-

dzie rowków zaokrąglono. Tuleja w strefie zasypu była termostatowana za pomocą termostatu wodnego.

Program i metodyka badań

Wartość temperatury nastawianej w poszczególnych strefach dostosowano do zmodyfikowanego układu uplastyczniającego wylączarki na podstawie badań i doświadczeń własnych [3–5] oraz literatury [6–10]. W chłodzonej wodą strefie zasypu ustalono temperaturę $T_0 = 40^\circ\text{C}$, w termostatowanej rowkowanej strefie zasilania temperatura wynosiła $T_I = 80^\circ\text{C}$, natomiast w pozostałych strefach, odpowiednio, $T_{II} = 160^\circ\text{C}$, $T_{III} = 180^\circ\text{C}$, $T_{IV} = 190^\circ\text{C}$, $T_V = 190^\circ\text{C}$, T_V – temperatura tulei łączącej układ uplastyczniający z głowicą wylączarką, w której temperatura wynosiła $T_{VI} = 175^\circ\text{C}$ oraz $T_{VII} = 175^\circ\text{C}$.

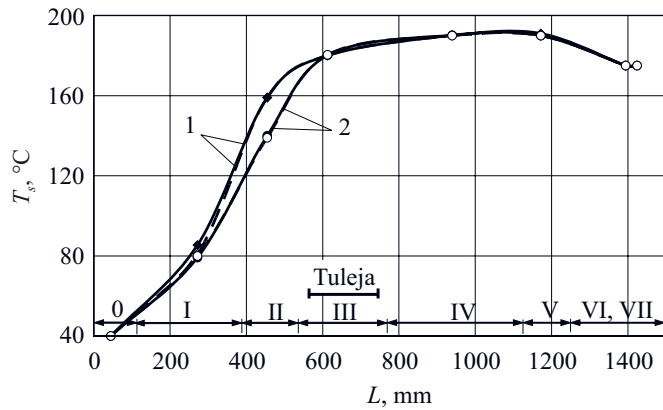
Pomiary przeprowadzono w warunkach szybkości ślimaka $n_s = 1,67; 3,33$ oraz $5,00\text{ s}^{-1}$, gdy tuleja obrotowa była nieruchoma, jak również gdy wykonywała ruch obrotowy w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka z szybkością $n_c = 0,83; 1,67; 2,50$ oraz $3,33\text{ s}^{-1}$. Po każdej zmianie warunków wylączania, pomiary czynników badanych bezpośrednio przeprowadzano po ustabilizowaniu się przebiegu procesu, co następowało po upływie ok. 10 min.

Zakres czynników oznaczanych bezpośrednio oraz pośrednio, charakteryzujących badany proces wylączania, a także określone właściwości otrzymanej wylączarki, były takie jak w modelu wylączarki.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Temperatura ścianki cylindra

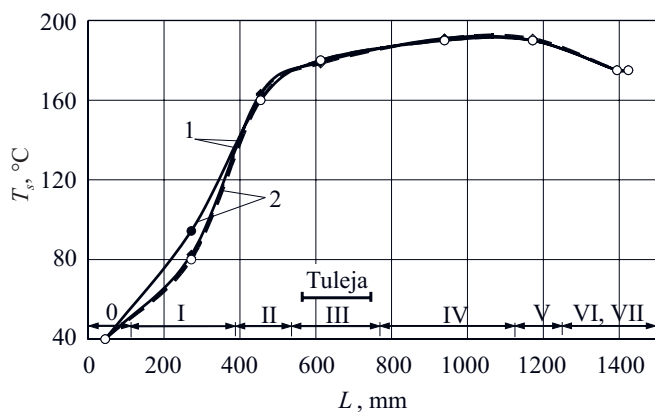
Przebieg zmian temperatury ścianki cylindra oraz głowicy wylączarkowej był, w dużej mierze, zgodny z wartościami zadanymi wstępnie w poszczególnych strefach grzejnych (rys. 3 i 4). Nie zaobserwowano wzrostu temperatury ścianki cylindra w wyniku oddziaływania tulei obrotowej, jak to miało miejsce w badaniach modelu wylączarki. Na utrzymywanie się zadanej wartości tem-



Rys. 3. Temperatura (T_s) ścianki cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wyltaczarskiej w funkcji ich długości (L); szybkość ślimaka (n_s) = 1,67 s⁻¹, szybkość tulei obrotowej cylindra (n_c): 1 – 0,0 s⁻¹, 2 – 3,33 s⁻¹, 0–V – strefy grzejne układu uplastyczniającego, VI, VII – strefy grzejne głowicy wyltaczarskiej, linie ciągłe – strefa zasypu i zasilania bez rowków, linie przerywane – strefa zasypu i zasilania z 8. rowkami wzdłużnymi

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 s⁻¹, barrel rotating sleeve 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 – hopper and feeding zone without grooves, dashed lines – hopper and feeding zone with rectilinear 8-th grooves

peratury ścianki cylindra w strefie z tuleją obrotową, istotny wpływ miało zastosowanie nowego rozwiązania konstrukcyjnego segmentu cylindra z tuleją obrotową. Dzięki regulacji luzu wzdłużnego tulei obrotowej oraz udoskonaleniu jej uszczelnienia i łożyskowania, znacz-



Rys. 4. Temperatura (T_s) ścianki cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wyltaczarskiej w funkcji ich długości (L); szybkość ślimaka (n_s) = 5,00 s⁻¹, szybkość tulei obrotowej cylindra (n_c): 1 – 0,0 s⁻¹, 2 – 3,33 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) = 5.00 s⁻¹, barrel rotating sleeve speed (n_c): 1 – 0.0 s⁻¹, 2 – 3.33 s⁻¹, other designations as in Fig. 3

nie zmniejszyło się generowanie ciepła tarcia zewnętrznego przez obracającą się tuleję. Udoskonalenie układu ogrzewania i termostatowania cylindra, w szczególności zwiększenie intensywności chłodzenia, także korzystnie wpłynęło na stabilność cieplną tej strefy układu uplastyczniającego.

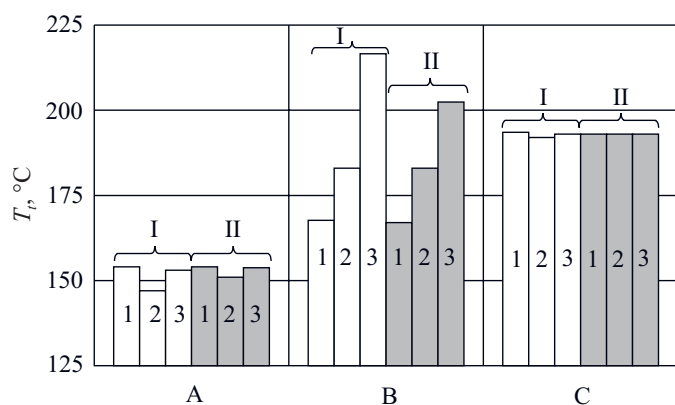
Zaobserwowano natomiast spadek temperatury ścianki cylindra poniżej wartości zadanej o 21 °C w II strefie grzejnej, bezpośrednio przed segmentem z tuleją obrotową. Obniżenie to następowało tylko przy najmniejszej z badanych szybkości ślimaka 1,67 s⁻¹, i obracającej się tulei cylindra, gdy strefa zasypu i zasilania była zarówno jednolita geometrycznie bez rowków, jak i rowkowana. W przypadku, gdy tuleja cylindra była nieruchoma oraz w warunkach większej szybkości ślimaka, temperatura w tej strefie utrzymywała się na zadanym poziomie. Przyczyny spadku temperatury ścianki cylindra przy najmniejszej szybkości ślimaka należy upatrywać tym razem w zbyt małym generowaniu ciepła tarcia bezpośrednio w tworzywie przetwarzanym oraz ciepła tarcia tworzywa o powierzchnię cylindra [10–14], przy równoczesnym, znacznym zwiększeniu natężenia przepływu tworzywa w wyniku oddziaływania obracającej się tulei cylindra. W takich warunkach ciepło pochodzące od grzejników oraz generowane w wyniku tarcia nie pokrywa potrzeb wynikających z endotermicznego procesu stapiania fazy krystalicznej, co najprawdopodobniej zachodzi właśnie przed segmentem z tuleją obrotową.

Analogiczne zjawisko obniżania się temperatury ścianki cylindra układu uplastyczniającego, w strefie w której zachodzi ten proces, zaobserwowano również w toku badań wyltaczania autotermicznego [10].

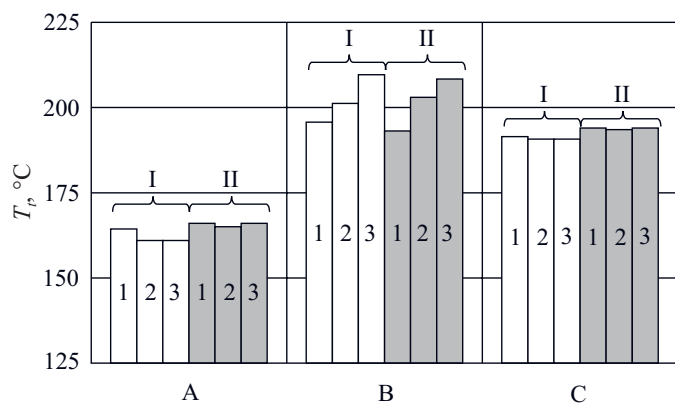
Temperatura tworzywa przetwarzanego

Zaobserwowano, że na temperaturę tworzywa w kanale przepływowym ślimaka, mierzona przed i za tuleją obrotową cylindra, ma wpływ zarówno szybkość obrotów tulei oraz ślimaka, jak i zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne strefy zasypu i zasilania (bez rowków lub rowkowanej). Przy najmniejszej badanej szybkości ślimaka, temperatura tworzywa przetwarzanego, mierzona przed tuleją obrotową, była niższa od wartości zadanej w tej strefie o 6–13 °C, w zależności od szybkości tulei obrotowej i zastosowanego rozwiązania strefy zasypu i zasilania (rys. 5). Po zwiększeniu szybkości ślimaka do 3,33 s⁻¹, różnica ta zmniejszyła się do 2–5 °C w przypadku strefy zasypu i zasilania bez rowków, gdy natomiast zastosowano strefę rowkowaną temperatura tworzywa odpowiadała wartości zadanej. Z kolei przy największej szybkości ślimaka 5,00 s⁻¹ i strefie rowkowanej temperatura tworzywa przed tuleją obrotową była wyższa od zadanej o 4–6 °C (rys. 6).

Znacznie większa zmienność temperatury tworzywa przetwarzanego występowała bezpośrednio za tuleją obrotową cylindra. Przy najmniejszej szybkości ślimaka 1,67 s⁻¹ i nieruchomej tulei cylindra, temperatura tworzy-



Rys. 5. Temperatura (T_p) tworzywa przetwarzanego w kanale przepływowym: A – przed tuleją obrotową cylindra, B – za tuleją obrotową cylindra, C – przed głowicą wylączarską; szybkość ślimaka (n_s) = $1,67 \text{ s}^{-1}$, w warunkach wzrostu szybkości tulei obrotowej cylindra (n_r): 1 – 0 s^{-1} , 2 – $1,67 \text{ s}^{-1}$, 3 – $3,33 \text{ s}^{-1}$, w układzie uplastyczniającym ze strefą zasypu i zasilania: I – bez rowków, II – z 8. rowkami wzdluznymi
Fig. 5. Temperature (T_p) of the polymer processed in the flow channel: A – before rotating sleeve of the barrel, B – behind rotating sleeve of the barrel, C – before the extruder head; screw speed (n_s) = $1,67 \text{ s}^{-1}$, for increasing speed of the rotating sleeve of the barrel (n_r): 1 – 0 s^{-1} , 2 – $1,67 \text{ s}^{-1}$, 3 – $3,33 \text{ s}^{-1}$, in the plasticizing system with hopper and feeding zone: I – without grooves, II – with rectilinear 8-th grooves



Rys. 6. Temperatura (T_p) tworzywa przetwarzanego w kanale przepływowym: A – przed tuleją obrotową cylindra, B – za tuleją obrotową cylindra, C – przed głowicą wylączarską; szybkość ślimaka (n_s) = $5,00 \text{ s}^{-1}$, pozostałe oznaczenia por. rys. 5
Fig. 6. Temperature (T_p) of the polymer processed in the flow channel: A – before rotating sleeve of the barrel, B – behind rotating sleeve of the barrel, C – before the extruder head; screw speed (n_s) = $5,00 \text{ s}^{-1}$, other designations as in Fig. 5

wa była niższa od zadanej w tej strefie o 12 °C (strefa zasypu i zasilania zarówno bez rowków, jak i z rowkami). Oddziaływanie tulei cylindra obracającej się ze zwiększoną szybkością powodowało natomiast sukcesywny wzrost temperatury tworzywa, maksymalnie nawet o 37 °C powyżej wartości zadanej (strefa zasypu i zasilania

bez rowków). Przy większych szybkościach ślimaka $3,33 \text{ s}^{-1}$ oraz $5,00 \text{ s}^{-1}$, temperatura tworzywa za tuleją obrotową była zawsze większa od zadanej. I tak, przy nieruchomej tulei, odpowiednio, o 13 °C i 16 °C oraz, gdy ta obracała się z największą szybkością, o 28 °C i 30 °C .

Opisane powyżej zmiany temperatury tworzywa przetwarzanego są związane zarówno z endotermicznym procesem stapiania fazy krystalicznej, jak i procesem generowania ciepła tarcia bezpośrednio w tworzywie przetwarzanym oraz tarcia tworzywa o powierzchnię cylindra [10–15].

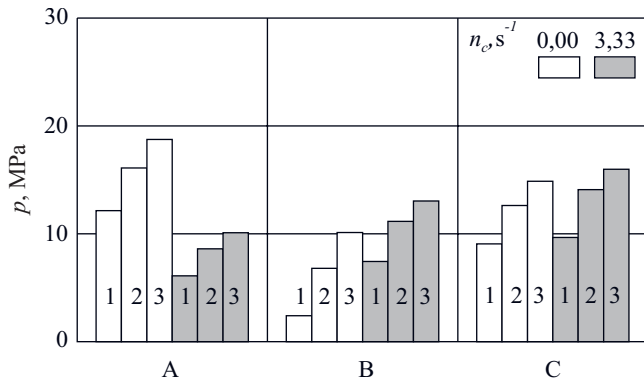
Podobnie jak w przypadku badań modelu wylączarki, temperatura tworzywa przetwarzanego mierzona w kanale przepływowym przed głowicą wylączarską nie ulegała istotnym zmianom.

Ciśnienie tworzywa

Charakter zmian rozkładu ciśnienia tworzywa wzdluz układu uplastyczniającego, w wyniku oddziaływania tulei obrotowej cylindra, obracającej się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, był podobny do charakteru zmian występujących w badaniach modelu wylączarki. Wraz ze zwiększaniem szybkości tulei obrotowej następował sukcesywny spadek ciśnienia tworzywa bezpośrednio przed tuleją oraz intensywny jego wzrost za tuleją obrotową. Zastosowane w prototypie modyfikacje konstrukcyjne ślimaka przetwórczego, które miały na celu, m.in. zwiększenie natężenia przepływu tworzywa w strefie poprzedzającej tuleję obrotową cylindra, spowodowały, że ciśnienie tworzywa przed tuleją obrotową nie uległo obniżeniu do wartości bliskich zero, co obserwowano w badaniach modelu wylączarki bez strefy rowkowanej (Cz. II pracy). Wartości ciśnienia tworzywa przed głowicą wylączarską także były wyraźnie większe niż występujące w modelu wylączarki.

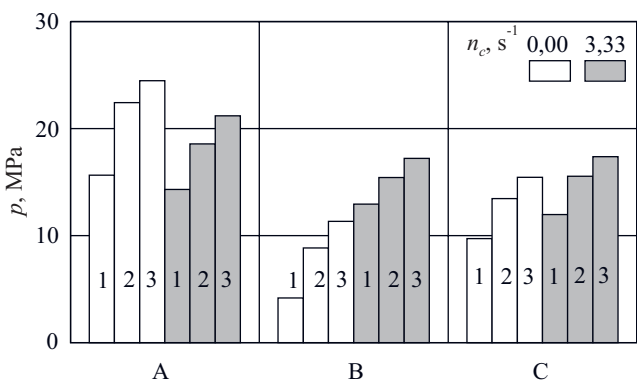
Maksymalne zmiany ciśnienia zachodziły przy największej z badanych szybkości tulei obrotowej $3,33 \text{ s}^{-1}$. W układzie uplastyczniającym ze strefą zasypu i zasilania bez rowków, na skutek oddziaływania tulei obracającej się z taką szybkością, ciśnienie tworzywa przed tuleją zmniejszyło się o 6,0; 7,5 oraz 8,6 MPa, w warunkach kolejno wzrastającej szybkości ślimaka (rys. 7). Wzrost ciśnienia tworzywa za tuleją obrotową wyniósł wówczas, odpowiednio, 5,0; 4,4 oraz 2,9 MPa, natomiast przed głowicą wylączarską wartości ciśnienia tworzywa były tylko nieznacznie wyższe, o 0,5–1,5 MPa.

Zastosowanie rowkowanej strefy zasypu i zasilania spowodowało wyraźne zwiększenie ciśnienia tworzywa przetwarzanego, przy zachowaniu podobnego rozkładu ciśnienia wzdluz układu uplastyczniającego oraz przebiegu jego zmian na skutek oddziaływania tulei obrotowej cylindra (rys. 8). Gdy tuleja obrotowa cylindra była nieruchoma, wprowadzenie strefy rowkowanej spowodowało wzrost ciśnienia tworzywa przed tuleją o, odpowiednio, 3,5; 6,3 oraz 5,8 MPa, przy kolejno zwiększanej szybkości ślimaka. Za tuleją wzrost ciśnienia był już



Rys. 7. Ciśnienie tworzywa (p) w kanale przepływowym: A — przed tuleją obrotową cylindra, B — za tuleją obrotową cylindra, C — przed głowicą wylączarską, w układzie uplastyczniającym ze strefą zasypu i zasilania bez rowków, przy nieruchomej tulei obrotowej cylindra oraz obracającej się z największą szybkością, w warunkach wzrostu szybkości obrotów ślimaka (n_s): 1 — $1,67 \text{ s}^{-1}$, 2 — $3,33 \text{ s}^{-1}$, 3 — $5,00 \text{ s}^{-1}$

Fig. 7. Polymer pressure (p) in the flow channel: A — before rotating sleeve of the barrel, B — behind rotating sleeve of the barrel, C — before the extruder head, in the plasticizing system with hopper and feeding zone without grooves, with stationary or rotating at the highest speed sleeve of the barrel, for increasing speed of the screw (n_s): 1 — 1.67 s^{-1} , 2 — 3.33 s^{-1} , 3 — 5.00 s^{-1}



Rys. 8. Ciśnienie tworzywa (p) w kanale przepływowym: A — przed tuleją obrotową cylindra, B — za tuleją obrotową cylindra, C — przed głowicą wylączarską, w układzie uplastyczniającym ze strefą zasypu i zasilania z 8. rowkami wzdłużnymi; oznaczenia por. rys. 7

Fig. 8. Polymer pressure (p) in the flow channel: A — before rotating sleeve of the barrel, B — behind rotating sleeve of the barrel, C — before the extruder head; in the plasticizing system with hopper and feeding zone with rectilinear 8-th grooves; other designations as in Fig. 7

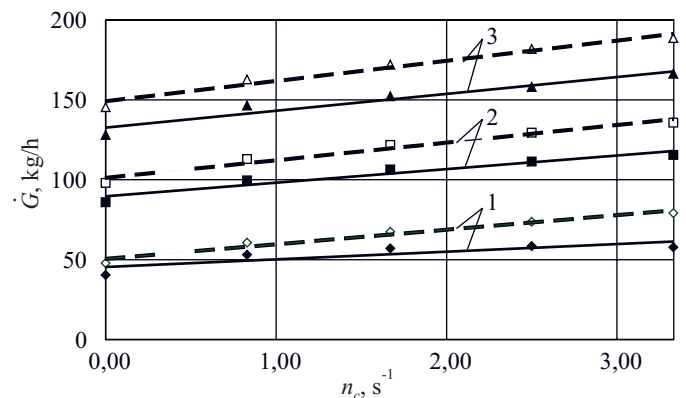
mniejszy i wyniósł 1,8; 2,0 oraz 1,2 MPa, natomiast przed głowicą wylączarską ciśnienie tworzywa było wyższe tylko o 0,6–0,9 MPa.

W układzie z rowkowaną strefą zasypu i zasilania, oddziaływanie tulei obrotowej powodowało mniej intensywny spadek ciśnienia tworzywa przed tuleją a równocześnie większy wzrost ciśnienia za tuleją i przed głowicą

wą wylączarską, niż w układzie uplastyczniającym bez strefy rowkowanej. Gdy tuleja obracała się z szybkością $3,33 \text{ s}^{-1}$, ciśnienie przed nią obniżyło się o, odpowiednio, 1,3; 3,8 oraz 3,3 MPa, przy kolejno zwiększanej szybkości ślimaka, za tuleją wzrosło o 8,7; 6,6 oraz 5,9 MPa, a przed głowicą wylączarską o 2,3; 2,1 oraz 1,9 MPa.

Natężenie przepływu tworzywa

Masowe natężenie przepływu tworzywa (\dot{G}), podobnie jak w przypadku modelu wylączarki (Cz. II i III pracy), zwiększało się proporcjonalnie wraz ze wzrostem szybkości tulei obrotowej cylindra (rys. 9). Wprawienie tulei obrotowej cylindra w ruch z największą z badanych szybkością $3,33 \text{ s}^{-1}$, powodowało wzrost natężenia przepływu tworzywa o 42,5; 34,2 oraz 29,8 %, przy kolejno



Rys. 9. Masowe natężenie przepływu (\dot{G}) tworzywa 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 — $5,00 \text{ s}^{-1}$, 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 — 1.67 s^{-1} , 2 — 3.33 s^{-1} , 3 — 5.00 s^{-1} , line designations as in Fig. 3

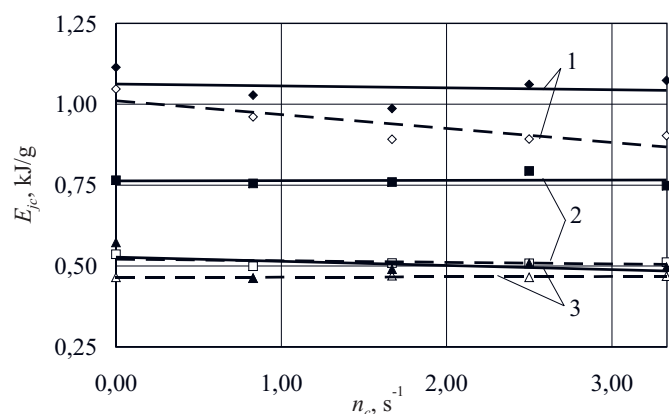
zwiększanej szybkości ślimaka (strefa zasypu i zasilania bez rowków). Wówczas, gdy w układzie uplastyczniającym zastosowano strefę zasypu i zasilania z 8. rowkami wzdłużnymi, wzrost natężenia przepływu tworzywa w wyniku oddziaływania tulei obrotowej był jeszcze większy i wyniósł, odpowiednio, 65,3; 38,5 oraz 29,7 %. Samo wprowadzenie strefy rowkowanej, przy nieruchomej tulei obrotowej cylindra, spowodowało wzrost natężenia przepływu o 18,0; 14,0; oraz 13,6 %, w odniesieniu do kolejnych zwiększanych szybkości ślimaka.

W porównaniu z modelem wylączarki, w prototypie wzrost natężenia przepływu tworzywa wraz ze zwiększaniem szybkości tulei obrotowej cylindra był wyraźnie większy i występował w całym badanym zakresie szybkości obrotów ślimaka, w przypadku zastosowania strefy zasypu i zasilania zarówno rowkowanej, jak i bez rowków. Jest to w dużej mierze wynikiem wprowadzonych

w prototypie wylączarki modyfikacji konstrukcyjnych ślimaka przetwórczego, które miały na celu, m.in. zwiększenie natężenia przepływu tworzywa w strefie poprzedzającej tuleję obrotową cylindra. W modelu ze strefą zasypu i zasilania bez rowków, po zastosowaniu tulei obrotowej z rowkami prostoliniowymi o przekroju trójkątnym, wzrost natężenia przepływu wraz z szybkością tulei występował bowiem tylko przy małych szybkościach ślimaka i wynosił maksymalnie 21,7 % (Cz. II pracy). W modelu wylączarki ze strefą zasypu i zasilania z 8. rowkami, maksymalne zwiększenie natężenia przepływu w wyniku oddziaływania tulei obrotowej wynosiło natomiast 46,0 % (Cz. III pracy).

Jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki

Zależności jednostkowego zużycia energii (E_{jc}) doprowadzanej do wylączarki, w funkcji szybkości tulei obrotowej cylindra, odpowiadające wykorzystaniu w układzie uplastyczniającym strefy zasypu i zasilania bez rowków lub rowkowanej, przedstawiono na rys. 10. Zastosowanie strefy rowkowanej powoduje wyraźne



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 s^{-1} , 2 – 3,33 s^{-1} , 3 – 5,00 s^{-1} , oznaczenia linii por. rys. 3

Fig. 10. Specific total energy consumption by the extruder (E_{jc}) versus the speed of the rotating sleeve of the barrel (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

zmniejszenie wartości E_{jc} ograniczone nie tylko do przypadku najmniejszej szybkości ślimaka. W modelu wylączarki natomiast, przy największej szybkości obrotów ślimaka następowało nawet zwiększenie zużycia energii (Cz. II i III pracy). W prototypie zmniejszenie wartości E_{jc} po zastosowaniu strefy rowkowanej, w odniesieniu do kolejnych rosnących szybkości ślimaka, wyniosło 5,4; 28,9 oraz 17,5 % (gdy tuleja obrotowa cylindra była nieruchoma).

Zwiększanie szybkości ślimaka powoduje, analogicznie jak w przypadku modelu wylączarki, obniżanie jednostkowego zużycia energii w następstwie wzrostu natężenia przepływu tworzywa, przeważającego nad zwiększeniem strumienia energii doprowadzanej do wylączarki. Wzrost szybkości obrotów ślimaka od 1,67 do 5,00 s^{-1} , przy nieruchomej tulei obrotowej cylindra, spowodował zmniejszenie E_{jc} o ok. 49 %, w warunkach strefy zasypu i zasilania bez rowków oraz aż o 55 % po zastosowaniu strefy rowkowanej.

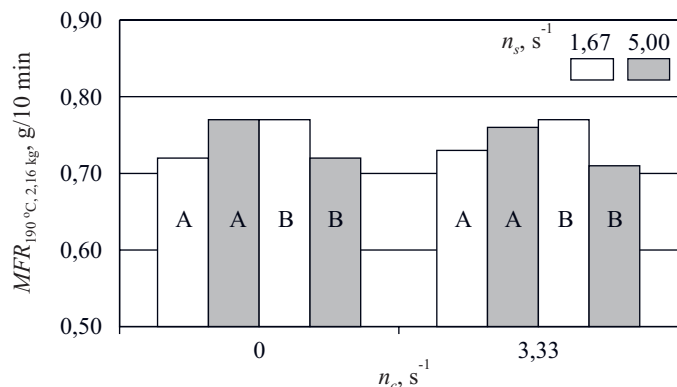
Obniżenie wartości E_{jc} w wyniku oddziaływania tulei obrotowej obserwowano tylko w przypadku najmniejszej badanej szybkości ślimaka 1,67 s^{-1} . W zakresie szybkości tulei obrotowej cylindra 1,67–3,33 s^{-1} , zastosowanie rowkowanej strefy zasypu i zasilania skutkowało zużyciem energii wynoszącym ok. 0,9 kJ/g, co odpowiadało zmniejszeniu o 14,3 % względem zużycia energii występującego przy nieruchomej tulei obrotowej. Takie zjawisko zmniejszenia zużycia energii w efekcie oddziaływania tulei obrotowej miało miejsce także w modelu wylączarki, również przy najmniejszej szybkości ślimaka, ale tylko wówczas, gdy zastosowano strefę zasypu i zasilania bez rowków lub z 6. rowkami. W modelu wylączarki ze strefą z 8. rowkami, przy najmniejszej badanej szybkości ślimaka, zwiększanie szybkości tulei obrotowej cylindra nie wpływało na jednostkowe zużycie energii.

W prototypie wylączarki, przy większych szybkościach ślimaka, zwiększanie szybkości tulei obrotowej cylindra nie ma wpływu na wartość E_{jc} . Utrzymuje się ona na stałym poziomie, co świadczy o proporcjonalnym wzroście natężenia przepływu tworzywa i strumienia energii doprowadzanej do wylączarki wraz ze wzrostem szybkości tulei obrotowej. W takich warunkach w modelu wylączarki występował nieznaczny wzrost jednostkowego zużycia energii.

Należy podkreślić, że wartość E_{jc} doprowadzanej do prototypu wylączarki była znacznie mniejsza niż w przypadku modelu. Najmniejsze jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do prototypu wylączarki wynosi 0,47 kJ/g, do modelu natomiast 0,79 kJ/g.

Masowy wskaźnik szybkości płynięcia

Podobnie, jak w przypadku modelu wylączarki nowej generacji (Cz. I–III pracy), w odniesieniu do prototypu również wykonano pomiary masowego wskaźnika szybkości płynięcia $MFR_{190\text{ }^{\circ}C/2,16\text{ kgf}}$ wg PN-EN ISO 1133:2006, próbek pobranych zarówno z otrzymanej wylączarki, jak i z granulatu tworzywa przetwarzanego. Wyniki pomiarów MFR wylączarki wykazały stosunkowo małe zróżnicowanie wartości średnich (rys. 11), wszystkie mieszczą się w przedziale 0,71–0,77 g/10 min (średnia arytmetyczna 0,74 g/10 min). Uzyskana średnia z pomiarów MFR 5 pobranych losowo z partii tworzywa przetwarzanego próbek granulatu ma wartość $0,72 \pm 0,01$ g/10 min. Można zatem zauważyć, że w badanym zakresie szybkości ślimaka oraz segmentu cylindra, współdziałających ze strefą zasypu i



Rys. 11. Masowy wskaźnik szybkości płynięcia (MFR) wytłoczyny wytworzonej w skrajnych warunkach szybkości ślimaka (n_s) oraz szybkości tulei obrotowej cylindra (n_c), w układzie uplastyczniającym ze strefą zasypu i zasilania: A – bez rowków, B – z 8. rowkami wzdłużnymi

Fig. 11. Mass flow rate (MFR) of the extrudate processed at the lowest and highest values of the screw speed (n_s) and the rotational sleeve of the barrel (n_c) in the plasticizing system with hopper and feeding zone: A – without grooves, B – with rectangular 8-th grooves

zasilania zarówno rowkowaną, jak i bez rowków, ich oddziaływanie nie powoduje niekorzystnych zmian cech przetwórczych tworzywa przetwarzanego.

PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można przyjąć, że ogólny charakter oddziaływania tulei obrotowej na przebieg procesu wytłaczania zarówno w modelu, jak i w prototypie jest taki sam. Wprowadzone w prototypie wytłaczarki, na podstawie wcześniejszych badań modelu, modyfikacje konstrukcyjne zarówno ślimaka przetwórczego, segmentu z tuleją obrotową oraz samej tulei, jak również strefy rowkowanej cylindra, spowodowały, m.in. że:

– W prototypie nie występuje intensywny wzrost temperatury ścianki cylindra w wyniku oddziaływania tulei obrotowej, jak to miało miejsce w modelu wytłaczarki. Obracająca się tuleja cylindra powoduje natomiast intensywny wzrost temperatury tworzywa przetwarzanego w kanale przepływowym ślimaka.

– Ciśnienie tworzywa przed tuleją obrotową nie zmniejsza się do wartości bliskich zeru, co obserwowano w badaniach modelu wytłaczarki bez strefy rowkowanej. Wartości ciśnienia tworzywa przed głowicą wytłaczarską w prototypie są wyraźnie większe niż występujące w modelu wytłaczarki.

– W prototypie wytłaczarki w porównaniu z modelem, wzrost natężenia przepływu tworzywa wraz ze zwiększaniem szybkości tulei obrotowej cylindra jest jednoznacznie większy i występuje w całym badanym

zakresie szybkości ślimaka, w przypadku zastosowania zarówno rowkowanej strefy zasypu i zasilania, jak i bez rowków. W modelu wytłaczarki bez strefy rowkowanej zjawisko wzrostu natężenia przepływu obserwowano tylko przy małych szybkościach ślimaka.

– Jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do prototypu wytłaczarki jest znacznie mniejsze w porównaniu z E_{jc} modelu. Zwiększanie szybkości tulei obrotowej cylindra powoduje zmniejszenie lub utrzymanie na stałym poziomie wartości E_{jc} w odróżnieniu od modelu, w przypadku którego następował wówczas nieznaczny wzrost zużycia energii. W prototypie wytłaczarki spadek wartości E_{jc} po zastosowaniu strefy rowkowanej występuje w całym badanym zakresie szybkości ślimaka a nie tylko w warunkach najmniejszej szybkości ślimaka, jak to ma miejsce w modelu wytłaczarki.

Można stwierdzić zatem, że modyfikacje i udoskonalenia konstrukcyjne modelu wytłaczarki miały bardzo korzystny wpływ na przebieg procesu wytłaczania przy użyciu prototypu wytłaczarki i usprawniły jego funkcjonowanie.

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

LITERATURA

1. www.basellorlen.pl
2. Zgłosz. pat. pol. 386 646 (2008).
3. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Kunstst. Int.* 2006, **9**, 89.
4. Sasimowski E.: *Polimery* 2008, **53**, 47.
5. Sikora R., Sasimowski E., Sikora J. W.: *Extrusion* 2011, **17**, 70.
6. Praca zbiorowa: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne” (red. Sikora R.), Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
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. Tadmor Z., Gogos C. G.: „Principles of polymer processing”, John Wiley and Sons, New Jersey 2006.
10. Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wytłaczarki”, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
11. Sikora J. W.: *Polimery* 2006, **51**, 285.
12. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Adv. Polym. Technol.* 2005, **24**, 21.
13. Rauwendaal Ch., Sikora J. W.: *Int. Polym. Proc.* 2000, **15**, 133.
14. Kowalska B.: *Kunst. Plast. Eur.* 2000, **90**, 10.
15. Sikora J. W.: „Screw extrusion” w „Advances in Polymer Processing” (red. Sabu T., Yang W.), Woodhead Publishing Limited, Oxford – Cambridge – New Delhi 2009.

Otrzymano 16 VI 2012 r.