

EMIL SASIMOWSKI

Politechnika Lubelska  
Katedra Procesów Polimerowych  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: e.sasimowski@pollub.pl

## Charakterystyka procesu wytłaczania z tuleją obrotową cylindra<sup>\*)</sup>

**Streszczenie** — Przedstawione wyniki badań doświadczalnych, dotyczące czynników określanych pośrednio w wymienionym w tytule procesie, stanowią rozwinięcie uprzednich badań czynników wyznaczanych bezpośrednio. Zrealizowano je za pomocą oryginalnego stanowiska badawczego wyposażonego w prototypową wytłaczarkę laboratoryjną z tuleją obrotową cylindra. Pozwoliło to na określenie zależności wartości siedmiu czynników określanych pośrednio i charakteryzujących omawiany proces wytłaczania [masowego natężenia przepływu przetwarzanego tworzywa (PE-LD), prędkości wytłaczania, mocy pobieranej przez wytłaczarkę, mocy cieplnej przenoszonej przez tworzywo, jednostkowego zużycia energii, energii cieplnej przenoszonej przez tworzywo oraz sprawności energetycznej wytłaczarki] od szybkości obrotowej ślimaka i obracającej się tulei cylindra. Oceniono także wpływ zmian konstrukcyjnych układu uplastyczniającego oraz warunków wytłaczania na właściwości uzyskiwanej wytłoczyny.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie, tuleja obrotowa cylindra, polietylen małej gęstości, czynniki określane pośrednio, szybkość obrotowa.

### CHARACTERISTICS OF AN EXTRUSION PROCESS WITH A ROTATING SLEEVE OF THE BARREL

**Summary** — The experimental results presented, concerning indirectly defined parameters in the title process, are the development of the former studies of directly defined parameters. The work was realized with the use of original test stand equipped with a prototype laboratory extruder with a rotating sleeve of the barrel (Fig. 1). It allowed defining the dependence of average values of indirectly defined parameters, characterizing the extrusion process discussed, on rotational speeds of the screw and rotating sleeve of the barrel (Fig. 2—8). These indirectly defined parameters were: the polymer (PE-LD) mass flow rate and extrusion velocity, extruder power input, thermal power conveyed by the polymer and extruder energy efficiency. The effects of constructional modifications of plasticating system as well as of extrusion conditions on functional properties of the extrudates obtained were evaluated (Fig. 9).

**Key words:** extrusion, rotating sleeve of the barrel, low-density polyethylene, indirectly defined parameters, rotational speed.

Badania nad doskonaleniem jednoślیمakowych układów uplastyczniających dotyczą przede wszystkim zmian konstrukcji cylindra oraz ślimaka. Wynika to z faktu, że właśnie te elementy wywierają zasadniczy wpływ na zwiększenie natężenia przepływu tworzywa, zmniejszenie energochłonności procesu wytłaczania oraz utrzymanie na żądanym poziomie jakości otrzymanej wytłoczyny.

Na podstawie głównie własnych badań teoretycznych [1—3] R. Sikora i E. Sasimowski zaproponowali nowy model kinematyczny układu uplastyczniającego z obracającym się równocześnie ślimakiem i cylindrem

[4]. Zasadniczą cechą tego modelu jest intensyfikacja procesów cieplnych, reologicznych, tribologicznych i kinematycznych prowadząca do wspomnianego zwiększenia natężenia przepływu tworzywa. Opierając się na tej oryginalnej koncepcji opracowano nowe, opatentowane [5] rozwiązanie konstrukcyjne układu uplastyczniającego z cylindrem trójczęściowym, którego środkowa część — tuleja — może być obracana w kierunku zgodnym lub przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka.

W prezentowanym poniżej tekście przedstawiono wyniki badań, które miały na celu określenie wpływu zastosowania tulei obrotowej cylindra w jednoślیمakowym układzie uplastyczniającym na charakterystykę procesu wytłaczania. Analizie poddano zależność masowego natężenia przepływu przetwarzanego tworzywa

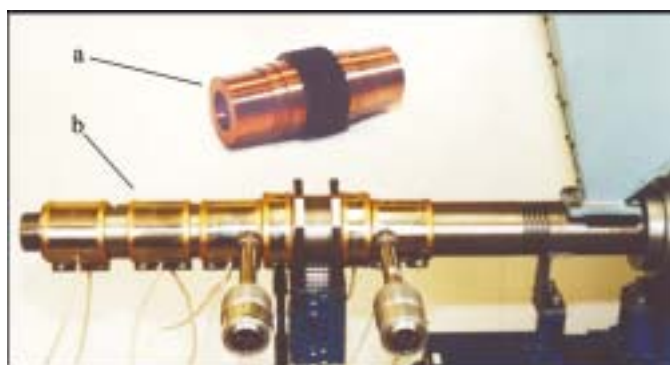
<sup>\*)</sup> Artykuł opiera się na treści referatu przedstawionego w ramach XI Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Bydgoszcz, 11—14 czerwca 2006 r.

i prędkości jego wytłaczania od szybkości tulei obrotowej cylindra oraz kierunku jej obrotów. Badano także wpływ tych dwóch parametrów na moc pobieraną przez wytłaczarkę, moc cieplną przenoszoną przez tworzywo, jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wytłaczarki, energię cieplną przenoszoną przez tworzywo jak również na sprawność energetyczną wytłaczarki.

### CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

#### Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem opracowanego i wykonanego w Katedrze Procesów Polimerowych Politechniki Lubelskiej oryginalnego stanowiska badawczego wyposażonego w prototypową wytłaczarkę, opisanego szczegółowo w publikacji [6]. W skład tego stanowiska, poza wytłaczarką laboratoryjną obejmującą wspomniany opatentowany układ uplastyczniający nowej konstrukcji [7] i głowicę wytłaczarską z dyszą o przekroju kołowym, wchodziły m.in. zintegrowany z komputerem układ pomiarowy do zbierania i przetwarzania danych, szafa sterownicza, momentomierz oraz licznik energii elektrycznej. W wytłaczarce zastosowano ślimak średnicy  $D = 25$  mm o stosunku  $L/D = 25$  z końcówką intensywnego ścinania oraz mieszania, przeznaczony do przetwórstwa polietylenu małej gęstości. Ślimak jest napędzany silnikiem prądu stałego o mocy 3,57 kW z możliwością bezstopniowej regulacji szybkości obrotowej. Tuleja obrotowa długości 120 mm o jednolitej geometrycznie walcowej powierzchni wewnętrznej (rys. 1) została wykonana ze stali 16HG. Na podstawie wyników badania procesu wytłaczania autotermicznego [8], usytuowano ją w miejscu, gdzie występuje największe zapotrzebowanie na ciepło, mianowicie w odległości 265 mm ( $10,6 D$ ) od końca cylindra (głowicy wytłaczarskiej). Na obydwu końcach tulei obrotowej zostały umieszczone tuleje wykonane z brązu B101, stanowiące łożyska ślizgowe i spełniające dodatkowo funk-



Rys. 1. Wygląd tulei obrotowej cylindra (a) oraz cylindra trójczęściowego (b) z zamocowanymi grzałkami  
Fig. 1. View of rotating sleeve of the barrel (a) and three-part barrel (b) with the heaters attached

cję uszczelniającą. Funkcję taką spełniają również dwa pierścienie z poli(tetrafluoroetylenu), usytuowane na powierzchniach czołowych segmentu. W części środkowej tulei znajduje się koło zębate służące do przekazywania mocy z trójfazowego silnika elektrycznego (2,2 kW) poprzez przekładnię łańcuchową i następnie zębata. Silnik ten jest połączony z falownikiem umożliwiającym bezstopniową regulację szybkości.

#### Tworzywo

Do badań użyto polietylenu małej gęstości (PE-LD) o nazwie handlowej „Malen E” i symbolu FABS 23-D022, wyprodukowanego w postaci granulatu przez firmę Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o. Tworzywo to jest powszechnie stosowane a jego właściwości ogólnie znane [9, 10] i dlatego nie zostały one tutaj podane.

#### Program badań

Uwzględniając cel pracy jak również ogólne zasady metodyki badań eksperymentalnych, opracowano program doświadczeń obejmujący zbiór czynników charakteryzujących badany proces wytłaczania. Wyodrębniono mianowicie czynniki wynikowe bezpośrednie, czynniki wynikowe pośrednie, czynniki zmienne, czynniki stałe a także czynniki zakłócające.

Przyjęto następujące czynniki wynikowe bezpośrednie: temperatura przetwarzanego tworzywa w określonych miejscach układu uplastyczniającego —  $t_{tI}$ ,  $t_{tII}$ ,  $t_{tIII}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); temperatura ścianki cylindra —  $t_0$ ,  $t_I$ ,  $t_{tII}$ ,  $t_{tIII}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); temperatura głowicy wytłaczarskiej  $t_{tIV}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); ciśnienie tworzywa —  $p_I$ ,  $p_{tII}$ ,  $p_{tIII}$  (MPa); moment obrotowy ślimaka —  $M_0$  (Nm). Badania wymienionych czynników wynikowych określanych bezpośrednio zostały przedstawione w odrębnej publikacji [11].

Czynniki wynikowe pośrednie stanowiły: masowe natężenie przepływu przetwarzanego tworzywa —  $\dot{G}$  (g/s) oraz prędkość jego wytłaczania —  $V$  (m/s); moc pobierana przez wytłaczarkę —  $\dot{Q}_c$  (kW); moc cieplna przenoszona przez tworzywo —  $\dot{Q}_N$  (W); jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wytłaczarki —  $E_{jc}$  (kJ/g); energia cieplna przenoszona przez tworzywo —  $E_N$  (kJ) oraz sprawność energetyczna wytłaczarki —  $\kappa_w$  (%).

Czynniki zmienne to: szybkość obrotowa ślimaka  $n_s = 1,33; 2,00$  i  $2,67 \text{ s}^{-1}$  oraz szybkość obrotowa tulei cylindra  $n_c = 0,50; 0,67; 1,00; 1,33; 1,67$  a także  $2,00 \text{ s}^{-1}$  — w przypadku obrotów o kierunku przeciwnym do obrotów ślimaka. W celach poznawczych wykonano również pomiary z tuleją obracającą się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka w przedziale jej szybkości  $n_c = 0,33; 0,50; 0,67; 1,00$  oraz  $1,33 \text{ s}^{-1}$ , a więc ograniczonym ze względu na stwierdzone generowanie w tworzywie w tych warunkach bardzo dużej ilości ciepła i niebezpieczeństwo przekroczenia dopuszczalnej temperatury przetwórstwa.

Wyodrębniono czynniki stałe, mianowicie: elementy konstrukcyjne układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej oraz urządzeń uzupełniających, liczba stref grzejnych układu uplastyczniającego — 3 i głowicy — 1, wydajność wentylatora chłodzącego strefę zasypu — 200 m<sup>3</sup>/h, liczba obrotów tarczy licznika energii elektrycznej — 10.

Wytypowano również czynniki zakłócające, czyli następujące niestabilności: prądu elektrycznego (zmiany od 219 do 241 V), temperatury otoczenia (w zakresie od 21 do 24 °C), wilgotności względnej przetwarzanego tworzywa (21,5—27,3 %) oraz wilgotności względnej otaczającego powietrza (50—55 %). Uznano przy tym, że wpływ tych czynników zakłócających na otrzymywane wyniki pomiarów jest pomijalnie mały.

W celu oceny ewentualnego wpływu zmian konstrukcyjnych układu uplastyczniającego oraz warunków wytłaczania na właściwości otrzymywanej wycieczyny określano jej wytrzymałość na rozciąganie, naprężenie rozciągające przy zerwaniu, udarność z karbem a także masowy wskaźnik szybkości płynięcia.

## Metodyka badań

Proces wytłaczania rozpoczynano od nagrzania cylindra układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej do zadanej temperatury, którą dobrano na podstawie doświadczeń własnych oraz zgodnie z wartościami podanymi w literaturze [12—15]. W poszczególnych strefach grzejnych temperatura miała wartość, odpowiednio,  $t_I = 150$  °C,  $t_{II} = 170$  °C i  $t_{III} = 165$  °C oraz w głowicy wytłaczarskiej  $t_{IV} = 155$  °C. Temperatura cylindra w strefie zasypu chłodzonej powietrzem z wentylatora wynosiła  $t_0 = 30$  °C.

Po osiągnięciu powyższych wartości temperatury uruchamiano silnik napędzający ślimak wytłaczarki i za pomocą bezstopniowej regulacji nastawiano jedną z pożądaných szybkości ślimaka. Przyjęto, że proces wytłaczania ulega stabilizacji cieplnej w ciągu ok. 30 min i dopiero po tym czasie przystępowano do pomiarów czynników wynikowych bezpośrednich. Następnie — zgodnie z przyjętym programem badań — uruchamiano silnik napędzający tuleję obrotową w kierunku przeciw-

nym lub zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka i nastawiano jedną z przyjętych wartości jej szybkości. Po cieplnym ustabilizowaniu działania wytłaczarki wykonywano pomiary czynników wynikowych bezpośrednich, przeprowadzając je w pięciu powtórzeniach; otrzymane wyniki poddawano następnie niezbędnemu opracowaniu statystycznemu. Uzyskane wartości czynników bezpośrednich podstawiano do odpowiednich wzorów [16] i obliczano wartości czynników pośrednich.

W toku prowadzonego procesu wytłaczania pobierano próbki wycieczyny, po czym określano jej wymienione powyżej podstawowe właściwości.

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

### Czynniki wynikowe pośrednie

Wyniki obliczeń czynników wynikowych pośrednich wykonanych na podstawie zmierzonych wartości czynników bezpośrednich zostały przedstawione w postaci graficznej na rys. 2—8.

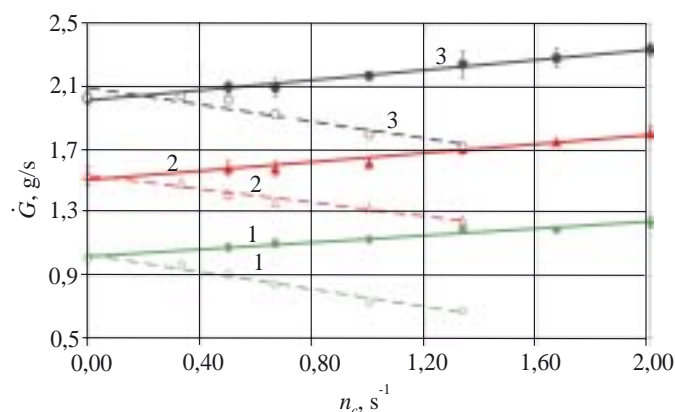
### Natężenie przepływu tworzywa

Zależność masowego natężenia przepływu tworzywa od szybkości tulei cylindra w warunkach różnych szybkości ślimaka przedstawia rys. 2.

Gdy kierunek obrotów tulei cylindra jest przeciwny do kierunku obrotów ślimaka, następuje proporcjonalne powiększanie się masowego natężenia przepływu tworzywa wraz ze wzrostem szybkości obrotów tulei. Linie (ciągłe na rys. 2) obrazujące przebiegi tych zmian otrzymano na drodze aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów. Czterokrotne zwiększenie szybkości tulei (od 0,50 s<sup>-1</sup> do 2,00 s<sup>-1</sup>) wywołało zwiększenie przyrostu natężenia przepływu średnio o 0,28 g/s. W serii zmian  $n_c$  przy wartości największej obserwuje się zwiększenie natężenia przepływu w stosunku do występującego gdy tuleja była nieruchoma o 23 %, 18 % lub 15 % w odniesieniu do zmiennych szybkości obrotów ślimaka ( $n_s = 1,33; 2,00$  oraz  $2,67$  s<sup>-1</sup>). Im większa jest szybkość ślimaka tym mniejszy jest proporcjonalny przyrost natężenia

Rys. 2. Masowe natężenie przepływu ( $\dot{G}$ ) tworzywa w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ );  $n_s$ : 1 — 1,33 s<sup>-1</sup>, 2 — 2,00 s<sup>-1</sup>, 3 — 2,67 s<sup>-1</sup> (linie ciągłe — kierunek obrotów tulei przeciwny do kierunku obrotów ślimaka, linie przerywane — kierunki obrotów zgodne)

Fig. 2. Polymer mass flow rate ( $\dot{G}$ ) versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ );  $n_s$ : 1 — 1.33 s<sup>-1</sup>, 2 — 2.00 s<sup>-1</sup>, 3 — 2.67 s<sup>-1</sup> (solid lines — the sleeve rotation oppositely directed to screw rotation, dashed lines — forward directions of rotations)



przepływu, spowodowany oddziaływaniem obracającej się tulei cylindra.

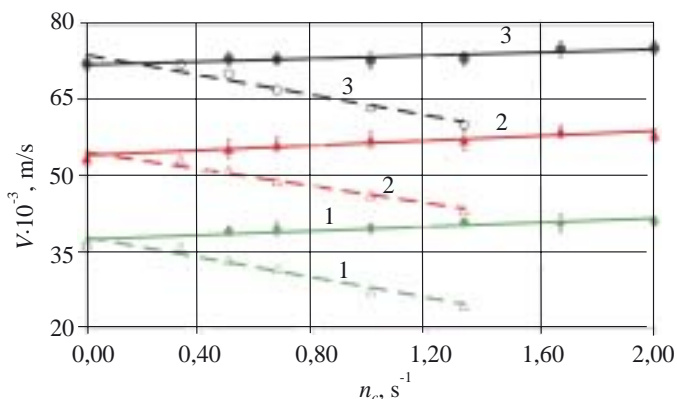
Na wykresach można zaobserwować także znane z literatury [10, 17–19] zjawisko proporcjonalnego powiększania się wartości  $\dot{G}$  wraz ze wzrostem szybkości obrotów ślimaka. Dwukrotne zwiększenie wartości  $n_s$  ( $1,33 \text{ s}^{-1} \rightarrow 2,67 \text{ s}^{-1}$ ) powoduje podwojenie masowego natężenia przepływu ( $1,01 \text{ g/s} \rightarrow 2,03 \text{ g/s}$ ).

Tuleja obracająca się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotu cylindra jest przyczyną ograniczenia natężenia przepływu (linie przerywane), co stanowi następstwo intensyfikacji przepływu wstecznego. Największe ograniczenie  $\dot{G}$  występuje wówczas, gdy tuleja obraca się z największą z badanych w tych warunkach szybkością  $n_c = 1,33 \text{ s}^{-1}$  i wynosi w przypadku kolejnych rosnących szybkości ślimaka 33 %, 19 % oraz 15 %, w stosunku do wartości  $\dot{G}$  odpowiadającej tulei nieruchomej.

### Prędkość wytłaczania

Gdy tuleja cylindra obraca się przeciwnie do kierunku obrotów ślimaka, prędkość wytłaczania tworzywa zwiększa się mniej intensywnie niż natężenie przepływu (rys. 3, linie ciągłe); przyczyną tego jest zwiększająca się średnica otrzymywanej wyczołczyny (rosnący efekt Barusa). W przypadku największej szybkości tulei ( $n_c = 2,00 \text{ s}^{-1}$ ) zwiększenie wartości  $V$  w stosunku do układu z nieruchomą tuleją wynosi 13 %, 9 % oraz 4 % w warunkach kolejnych badanych szybkości ślimaka —  $n_s = 1,33; 2,00; 2,67 \text{ s}^{-1}$ .

Obroty tulei cylindra zgodne z kierunkiem obrotów ślimaka (linie przerywane) powodują zmniejszenie prędkości wytłaczania, a przebieg opisujących je linii jest w tym przypadku bardzo zbliżony do przebiegu linii charakteryzujących natężenie przepływu. Wiąże się



Rys. 3. Prędkość wytłaczania ( $V$ ) tworzywa w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ); numery i rodzaj krzywych jak na rys. 2

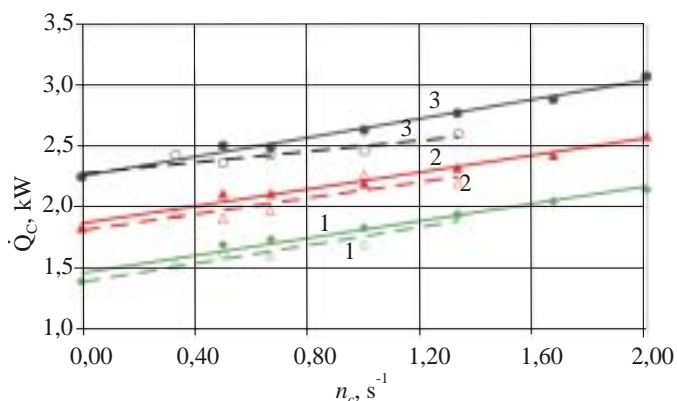
Fig. 3. Polymer extrusion velocity ( $V$ ) versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ ). Curves numbers and types as in Fig. 2

to z małym zróżnicowaniem średnicy wyczołczyny powstającej w tych warunkach wytłaczania. Również największe procentowe zmniejszenie wartości prędkości wytłaczania, względem układu z nieruchomą tuleją cylindra jest podobne do występującego w analizie natężenia przepływu; wynosi ono 33 %, 19 % oraz 17 % w odniesieniu do kolejnych rosnących szybkości obrotów ślimaka.

### Moc pobierana przez wyczołczarkę

Moc pobieraną przez wyczołczarkę (rys. 4) obliczano na podstawie pomiarów zużycia energii doprowadzanej do wyczołczarki. Ulega ona wraz ze zwiększaniem szybkości obrotów tulei cylindra w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka niemal jednakowemu zwiększeniu, niezależnie od szybkości obrotów ślimaka. Średnia wartość współczynnika kierunkowego linii opisujących przebieg  $\dot{Q}_c$  w funkcji  $n_c$  wynosi 0,3773. Oznacza to, że w badanym zakresie zwiększenie wartości  $n_c$  o jednostkę szybkości powoduje wzrost mocy całkowitej pobieranej przez wyczołczarkę średnio o 377,3 W.

Zwiększenie szybkości samego ślimaka, gdy tuleja cylindra pozostaje nieruchoma, powoduje także wzrost pobieranej mocy; charakter tych zmian w badanym zakresie  $n_s$  jest również liniowy.



Rys. 4. Moc ( $\dot{Q}_c$ ) pobierana przez wyczołczarkę w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ); numery i rodzaj krzywych jak na rys. 2

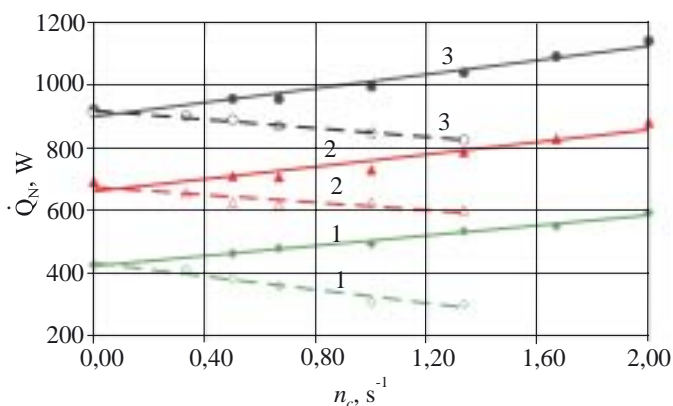
Fig. 4. Extruder power input ( $\dot{Q}_c$ ) versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ ). Curves numbers and types as in Fig. 2

Na rysunku 4 przedstawiono też zależność wartości  $\dot{Q}_c$  od szybkości tulei cylindra obracającej się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka. W tym przypadku moc pobierana przez wyczołczarkę jest mniejsza ze względu na sprawniejszy energetycznie niż nagrzewanie od grzejników proces generowania w układzie uplastyczniającym dużej ilości ciepła tarcia [20–22]; zjawisko to jest wynikiem oddziaływania tulei obrotowej oraz jednoczesnego zmniejszania się natężenia przepływu

wu. Wartość  $\dot{Q}_c$  jest mniejsza w porównaniu z układem, w którym tuleja obraca się z szybkością  $n_c = 1,33 \text{ s}^{-1}$  w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, o 5–14 %, w zależności od wartości  $n_s$ . Na przykład, przyrost mocy pobieranej przez wyciągarkę, gdy tuleja cylindra zostaje wprowadzona w ruch obrotowy z szybkością  $n_c = 1,33 \text{ s}^{-1}$  w kierunku zgodnym z obrotami ślimaka  $n_s = 2,67 \text{ s}^{-1}$  wynosi 15 % i jest mniejszy od występującego w przypadku kierunku obrotów tulei przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, kiedy to wynosi 22 %.

#### Moc cieplna przenoszona przez tworzywo

Moc cieplna przenoszona przez tworzywo ulega wzrostowi ze zwiększaniem szybkości obrotów zarówno ślimaka, jak i tulei cylindra wówczas, gdy obraca się ona w stosunku do ślimaka w kierunku przeciwnym (rys. 5). Obserwowane powiększanie się wartości  $\dot{Q}_N$  jest następstwem zwiększania się natężenia przepływu tworzywa oraz wspomnianego sprawniejszego energetycznie od nagrzewania grzejnikami elektrycznymi generowania ciepła tarcia w wyniku oddziaływania tulei obro-



Rys. 5. Moc cieplna ( $\dot{Q}_N$ ) przenoszona przez tworzywo w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ); numery i rodzaj krzywych jak na rys. 2

Fig. 5. Thermal power conveyed by the polymer ( $\dot{Q}_N$ ) versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ ). Curves numbers and types as in Fig. 2

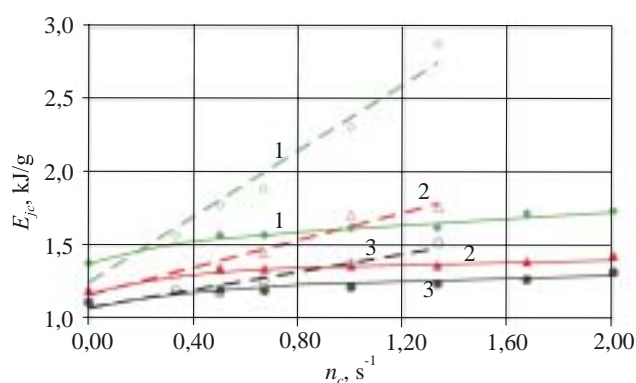
towej cylindra. Dwukrotne zwiększenie szybkości ślimaka wywołuje ponad dwukrotny wzrost omawianej mocy cieplnej. Zastosowanie tulei obrotowej cylindra, w zależności od szybkości jej obrotów, zwiększa moc przenoszoną przez tworzywo o 24–40 %; ta ostatnia wartość dotyczy największej z badanych wartości  $n_c$  ( $2,00 \text{ s}^{-1}$ ).

Natomiast w przypadku, gdy tuleja cylindra obraca się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka, moc cieplna przenoszona przez tworzywo zmniejsza się w sposób liniowy. Jest to spowodowane znacznym ograniczeniem natężenia przepływu przetwarzanego tworzywa. Gdy tuleja obraca się z największą szybko-

cią ( $n_c = 1,33 \text{ s}^{-1}$ ) to w warunkach kolejno wzrastających szybkości ślimaka  $n_s$  zmniejszenie wartości  $\dot{Q}_N$  wynosi, odpowiednio, 30 %, 13 % oraz 10 %.

#### Jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wyciągarki

W wyniku zastosowania tulei obrotowej cylindra jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wyciągarki ulega stopniowemu wzrostowi wraz z szybkością obrotów tej tulei w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka (rys. 6). Świadczy to o bardziej intensywnym w tych warunkach wzroście mocy doprowadzanej do układu napędowego tulei cylindra w porównaniu z intensyfikacją natężenia przepływu tworzywa. Maksymalny wzrost  $E_{jc}$  odpowiadający największej bada-



Rys. 6. Jednostkowe zużycie energii ( $E_{jc}$ ) doprowadzanej do wyciągarki w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ); numery i rodzaj krzywych jak na rys. 2

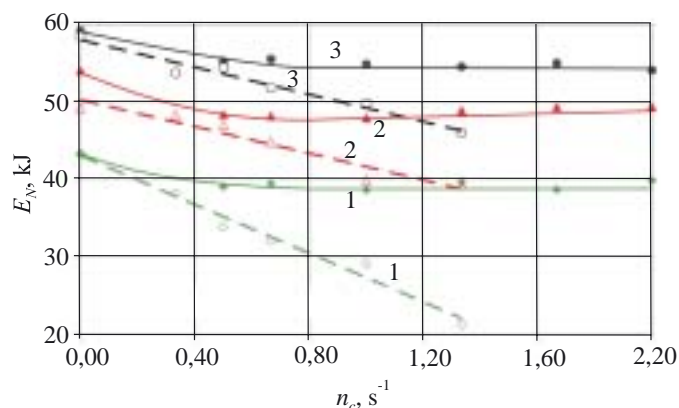
Fig. 6. Specific energy consumption ( $E_{jc}$ ) by the extruder versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ ). Curves numbers and types as in Fig. 2

nej wartości  $n_c = 2,00 \text{ s}^{-1}$  i najmniejszej wartości  $n_s = 1,33 \text{ s}^{-1}$  wynosi 26 %. Zwiększanie szybkości ślimaka powoduje zmniejszenie jednostkowego zużycia energii, co jest następstwem silniejszego wzrostu natężenia przepływu tworzywa w stosunku do dostarczanego strumienia energii. W wyniku podwojenia wartości  $n_s$  ( $1,33 \text{ s}^{-1} \rightarrow 2,67 \text{ s}^{-1}$ ) (gdy tuleja jest nieruchoma)  $E_{jc}$  zmniejsza się o 20 %. Zjawisko to obserwowano także w procesie konwencjonalnym [23, 24].

Jeżeli tuleja cylindra obraca się w kierunku zgodnym ze ślimakiem, to wzrost jednostkowego zużycia energii doprowadzanej do wyciągarki wraz ze zwiększaniem jej szybkości jest jeszcze większy, ponieważ oddziaływanie tulei ogranicza w tym przypadku natężenie przepływu tworzywa.

#### Energia cieplna przenoszona przez tworzywo

Rysunek 7 ilustruje zależność ilości energii cieplnej przenoszonej przez tworzywo od szybkości obrotów tulei cylindra, gdy obraca się ona w kierunku przeciwnym, bądź też zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka.



Rys. 7. Energia cieplna ( $E_N$ ) przenoszona przez tworzywo w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ); numery i rodzaj krzywych jak na rys. 2

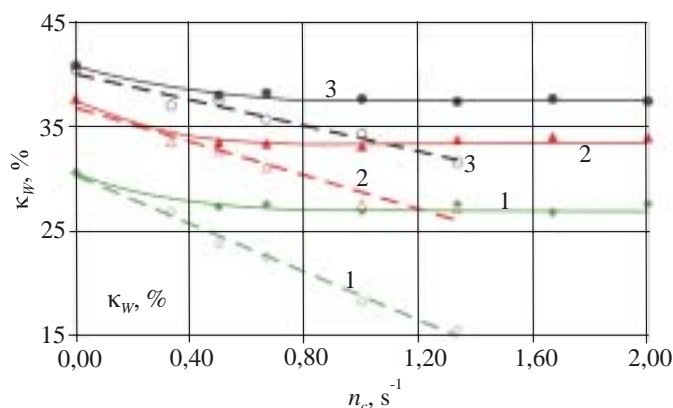
Fig. 7. Thermal energy conveyed by the polymer ( $E_N$ ) versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ ). Curves numbers and types as in Fig. 2

Wyraźnie jest widoczna korelacja przebiegu odpowiednich linii z przebiegiem linii pokazujących jednostkowe zużycie energii doprowadzanej do wylączarki przedstawionych na rys. 6, ponieważ także i tutaj dominujący wpływ wywiera natężenie przepływu tworzywa, warunkujące wartość  $E_N$ . Podobnie jak w przypadku  $E_{jcr}$  charakter zmian wartości  $E_N$  w warunkach tulei cylindra obracającej się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka jest liniowy.

#### Sprawność energetyczna

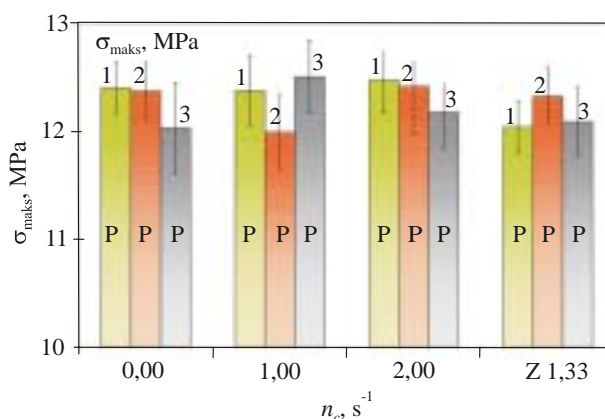
Sprawność energetyczna wylączarki (z nieruchomą tuleją) zwiększa się wraz z szybkością obrotów ślimaka od 31 % do 41 %, gdy szybkość tych obrotów ulega podwojeniu ( $n_s = 1,33 s^{-1} \rightarrow 2,67 s^{-1}$ ), co jest zgodne z danymi z literatury [23, 25]. Zastosowanie tulei obrotowej cylindra obracającej się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka powoduje nieznaczne zmniejszenie sprawności — średnio o 3 % w przypadku najmniejszej wartości  $n_c = 0,50 s^{-1}$  (rys. 8). Zwiększanie szybkości tulei obrotowej cylindra nie wpływa tu w istotny sposób na przebieg linii charakteryzujących  $\kappa_w$ .

Zjawisko zmniejszenia sprawności po uruchomieniu układu napędowego tulei cylindra może być w znacznym stopniu spowodowane zastosowaniem (w celu wykonania pomiarów w szerokim przedziale  $n_c$ ) silnika o większej mocy niż jest to zazwyczaj wymagane oraz brakiem izolacji cieplnej układu uplastyczniającego, jak również stratami energii w układzie ułożyskowania tulei. Należy także podkreślić, że sprawność silnika o szybkości regulowanej za pomocą przetwornika częstotliwości — falownika jest mniejsza niż silnika zasilanego bezpośrednio z sieci [26]. Można przypuszczać, że użycie silnika o mocy dobranej specjalnie do konkretnych warunków wylączania oraz równoczesne zastosowanie odpowiednich przełożeń przekładni umożliwia-



Rys. 8. Sprawność energetyczna wylączarki ( $\kappa_w$ ) w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ); numery i rodzaj krzywych jak na rys. 2

Fig. 8. Extruder energy efficiency ( $\kappa_w$ ) versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ) for different screw rotation speed ( $n_s$ ). Curves numbers and types as in Fig. 2



Rys. 9. Wytrzymałość na rozciąganie ( $\sigma_{maks}$ ) wylączarki, otrzymanej w warunkach różnej szybkości obrotów ślimaka ( $n_s$ ), w funkcji szybkości obrotów tulei cylindra ( $n_c$ ) obracającej się w kierunku przeciwnym (P) bądź zgodnym (Z) z kierunkiem obrotów ślimaka; wartości  $n_s$ : 1 — 1,33  $s^{-1}$ , 2 — 2,00  $s^{-1}$ , 3 — 2,67  $s^{-1}$

Fig. 9. Tensile strength ( $\sigma_{maks}$ ) of extrudates, obtained at different screw rotation speed ( $n_s$ ), versus the barrel sleeve rotation speed ( $n_c$ ). The sleeve rotation oppositely (P) or forward directed (Z) to screw rotation;  $n_s$  values: 1 — 1.33  $s^{-1}$ , 2 — 2.00  $s^{-1}$ , 3 — 2.67  $s^{-1}$

jących jego działanie ze znamionową szybkością, pozwoliłoby na uzyskanie większej sprawności.

Znacznie mniejszą sprawnością odznaczał się natomiast układ, w którym tuleja cylindra obracała się w kierunku zgodnym z kierunkiem obrotów ślimaka. Widoczny jest wyraźny spadek sprawności energetycznej wylączarki wraz ze wzrostem szybkości obrotowej tulei cylindra. Wartość  $\kappa_w$  wynosiła w warunkach największej wartości  $n_c = 1,33 s^{-1}$  16 % ( $n_s = 1,33 s^{-1}$ ), 27% ( $n_s = 2,00 s^{-1}$ ) bądź 32 % ( $n_s = 2,67 s^{-1}$ ), co stanowi, odpowied-

nio, 51 %, 72 % lub 77 % wartości charakteryzujących układy o  $n_c = 0$  i o takich samych wartościach  $n_s$ . Ten charakter zmian sprawności energetycznej jest wywołany, podobnie jak w przypadku mocy cieplnej przenoszonej przez tworzywo, znacznym ograniczeniem natężenia przepływu tworzywa przez oddziaływanie tulei cylindra.

### Właściwości wytłoczyny

Na podstawie pomiarów wytrzymałości na rozciąganie, naprężenia rozciągającego przy zerwaniu oraz udarności z karbem, a także masowego wskaźnika szybkości płynięcia stwierdzono, że w badanym zakresie szybkości obrotowej ślimaka i tulei cylindra (obracającej się w kierunku zgodnym lub przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka) ich oddziaływanie wywiera mało istotny wpływ na wymienione właściwości wytłoczyny. Obserwuje się mianowicie niewielkie tylko zróżnicowanie uzyskiwanych wartości średnich, co zostało pokazane na przykładzie zależności wytrzymałości na rozciąganie wytłoczyny w funkcji szybkości obrotowej tulei cylindra (rys. 9).

### WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników badań doświadczalnych procesu wytłaczania z zastosowaniem układu uplastyczniającego z tuleją obrotową cylindra wytłaczarki, można sformułować następujące wnioski:

— Do zastosowań przetwórczych predestynowany jest układ, w którym tuleja cylindra obraca się w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka, powodując liniowy wzrost masowego natężenia przepływu przetwarzanego tworzywa wraz ze wzrostem jej szybkości obrotowej. Natomiast układ, w którym kierunek obrotów tulei cylindra jest zgodny z kierunkiem obrotów ślimaka może znaleźć zastosowanie raczej w procesach mieszania ze względu na intensyfikację przepływu wstecznego, czego następstwem jest ograniczenie przepływu tworzywa w kierunku głowicy wytłaczarskiej.

— Zastosowanie tulei obrotowej cylindra powoduje wzrost mocy cieplnej przenoszonej przez tworzywo a także jednostkowego zużycia energii wraz z powiększaniem szybkości jej obrotów w kierunku przeciwnym do kierunku obrotów ślimaka. Stanowi to skutek bardziej intensywnego wzrostu mocy doprowadzanej do układu napędowego tulei cylindra w porównaniu z uzyskiwaną intensyfikacją przepływu tworzywa i przyczynia się do niewielkiego ograniczenia sprawności energetycznej wytłaczarki. Wzrost jednostkowego zużycia energii doprowadzanej do wytłaczarki staje się jednak znaczny, gdy tuleja cylindra obraca się w kierunku zgodnym z obrotami ślimaka; następuje wówczas obniżenie mocy cieplnej przenoszonej przez tworzywo ponieważ maleje natężenie przepływu tworzywa. Układ

taki charakteryzuje się już znacznie mniejszą sprawnością energetyczną.

— Wytłoczyna otrzymywana w badanym zakresie szybkości obrotów ślimaka oraz tulei cylindra charakteryzuje się dobrymi właściwościami użytkowymi. Nie zaobserwowano związku pomiędzy tymi właściwościami a szybkością obrotową zarówno ślimaka, jak i tulei cylindra.

— Interesujące i owocne wydaje się kontynuowanie badań, w których zostałyby określony wpływ na proces wytłaczania takich czynników jak długość oraz położenie w układzie uplastyczniającym tulei obrotowej cylindra, jej cechy geometryczne oraz makrostruktura powierzchni wewnętrznej a także dokonywanie udoskonaleń konstrukcji pozostałych stref układu uplastyczniającego. Odrębnym zagadnieniem badawczym może być wykorzystanie zmian szybkości obrotowej tulei cylindra jako dodatkowego czynnika sterującego w procesie wytłaczania autotermicznego.

Przedstawione w niniejszej publikacji wyniki badań należy traktować jako dane wejściowe do optymalizacji zarówno charakterystyki technologicznej prototypowej wytłaczarki, jak i warunków procesu wytłaczania. Optymalizacja taka z pewnością pozwoli na uzyskanie znacznie większej wydajności procesu wytłaczania z zachowaniem wymaganej jakości otrzymywanej wytłoczyny. Należy dążyć do zmniejszenia zużycia energii oraz poprawy pozostałych czynników opisujących proces wytłaczania. W związku z tym trzeba zwiększyć natężenie przepływu w strefach zasypu i zasilania — poprzedzających strefę z tuleją obrotową — na drodze modyfikacji konstrukcyjnych ślimaka i cylindra. Jest także wskazana optymalizacja układu napędowego tulei obrotowej oraz zastosowanie izolacji cieplnej układu uplastyczniającego.

### LITERATURA

1. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 1999, **44**, 608.
2. Sikora R., Sasimowski E.: *Intern. Polym. Proc.* 2000, **15**, 221.
3. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 2000, **45**, 141.
4. Sikora R., Sasimowski E.: *Polimery* 2000, **45**, 264.
5. *Pat. pol.* 185 728 (2003).
6. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Kunststoffe* 2006, nr 7, 104.
7. Sikora R., Sasimowski E.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2005, nr 3, 83.
8. Sikora J.: *Polimery* 1997, **42**, 565.
9. Prospekty i katalogi firmy Basell Orlen Polyolefins Sp. z o.o.
10. Sikora J. W., Kapuśniak T.: *Polimery* 2005, **50**, 748.
11. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Kunststoffe* 2006, nr 9, 89.
12. Praca zbiorowa: „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik”, t. II „Extrusionsanlagen” (red. Hansen F., Knappe W., Potente H.), Carl Hanser Verlag, München — Wien 1986.

13. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
14. Garbacz T.: *Polimery* 2004, **49**, 23.
15. Samujło B.: *Polimery* 2003, **48**, 540.
16. Sikora J. W., Sasimowski E.: *Adv. Polym. Technol.* 2005, **24**, 21.
17. Sikora R., Tomaszewski J.: *Polimery* 1982, **27**, 170.
18. Stefański M.: *Mechanik* 1980, nr 1, 34.
19. Wilczyński K.: „Teoria wytłaczania jednoślismakowego tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
20. Rauwendaal Ch.: „Polymer Extrusion”, Hanser Publishers, Munich — Vienna — New York 1986.
21. Sikora J.: *Intern. Polym. Proc.* 1998, **13**, 9.
22. Sikora J. W.: *Polimery* 2006, **51**, 285.
23. Chung C. I.: „Energy Efficiency in Single Screw Extrusion”, Society of Plastics Engineers — Annual Technical Conference (SPE ANTEC) 1983, str. 919.
24. Stasiak J.: *Polimery* 2005, **50**, 881.
25. Sikora R.: *Polimery* 1987, **32**, 247.
26. Bajorek Z.: „Teoria maszyn elektrycznych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.

---

### W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- Polimery nanohybrydowe zawierające poliedryczne oligosilseskwioksany
- Elektrochemiczna synteza polimerów fotoluminescencyjnych z tienylenowych pochodnych poli-fenylowinylenu (*j.ang.*)
- Wpływ wybranych adduktów Dielsa-Aldera kwasów żywiczych na przebieg procesów utwardzania żywic epoksydowych (*j.ang.*)
- Badanie stabilności chemicznej prepolimerów eterouretanowych
- Wpływ sposobu łączenia składników i długości włókien na właściwości mechaniczne kompozytów manila/polipropylen (*j.ang.*)
- Nowe bezhalogenowe antypireny — uniepalnianie nienasyconych żywic poliestrowych z zastosowaniem związków boru
- Modyfikacja sztywnej pianki poliuretanowo-poliizocyjanurowej wybranymi napelniaczami proszkowymi
- Możliwości recyklingu mieszanek poli(chlorek winylu)/poliamid 12 (*j.ang.*)
- Odporność kompozytów polichlorku winylu z włóknami drzewnymi na działanie promieniowania UV (*j.ang.*)