

JANUSZ W. SIKORA

Politechnika Lubelska

Wydział Mechaniczny

Katedra Przetwórstwa Tworzyw Wielkocząsteczkowych

ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

## Badania doświadczalne procesu wytłaczania autotermicznego polietylenu małej gęstości

### EXPERIMENTAL STUDIES ON AUTOTHERMAL EXTRUSION OF LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE)

**Summary** — LDPE was autothermally extruded in a conventional T-32 extruder (ZMCh „Metalchem”, Gliwice, PL) equipped with a three-zone screw ( $L/D = 25$ ), circular head and a cooling and a receiving system. The total thermal power ( $\dot{Q}_G$ ) generated in, and transferred ( $\dot{Q}_N$ ) by the polymer, total power loss ( $\dot{Q}_S$ ), polymer mass and volume flow rates ( $\dot{G}$  and  $\dot{W}$ ), extruder's energy efficiency ( $\kappa_W$ ) and total energy consumption per unit mass ( $E_{JC}$ ) are plotted against the rotational speed ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw. The distributions of temperatures along the plasticating system and along the extrusion head are described. The temperatures at the surface ( $t_{WZ}$ ) and at the center ( $t_{WS}$ ), of the extrudate are plotted against the screw speed. Selected physical properties of the extrudate are discussed in relation to autothermal extrusion conditions. Mass flow rate (MFR), extrudate swelling (corrected Barus effect), and extrudate hardness at various cross-section points were measured.

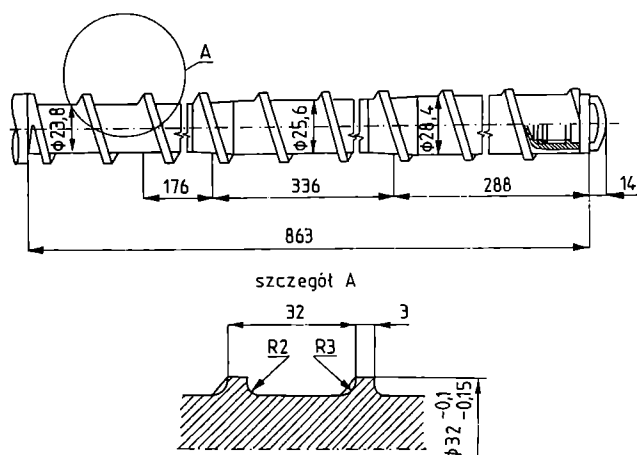
Jak wykazano w jednej z wcześniejszych prac [1], stan wiedzy w dziedzinie wytłaczania autotermicznego tworzywa był do niedawna niewystarczający. Dopiero kompleksowe podejście do tego problemu pozwoliło na próbę opracowania teorii słusznej w odniesieniu do wszystkich stref układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej [2—5]. Umożliwiła ona teoretyczne wyznaczenie, z zadowalającą dokładnością, ważniejszych zależności charakteryzujących proces wytłaczania autotermicznego. Dotyczy to przede wszystkim określenia bilansów energetycznych poszczególnych stref funkcjonalnych układu uplastyczniającego wytłaczarki i całego układu oraz głowicy wytłaczarskiej, wyznaczenia prędkości ślimaka, sprawności energetycznej wytłaczarki, jednostkowego zużycia energii, rozkładu temperatury na długości układu uplastyczniającego i głowicy. Wyniki badań doświadczalnych wytłaczania autotermicznego nie były jednak dotychczas publikowane. Dostępne są jedynie mniej lub bardziej szczegółowe charakterystyki techniczne, a także dane handlowe wytłaczarek autotermicznych oraz linii technologicznych z tymi wytłaczarkami [6—15].

Celem omówionych w niniejszym artykule badań doświadczalnych było określenie wybranych zależności charakteryzujących proces wytłaczania autotermicznego polietylenu małej gęstości (PE-LD) oraz ocenienie wy-

branych właściwości wytłoczyny otrzymanej w wyniku tego procesu.

### CHARAKTERYSTYKA SPOSOBU POSTĘPOWANIA

Badania przeprowadzono za pomocą linii technologicznej wytłaczania składającej się z wytłaczarki jednoślindakowej T-32 produkcji ZMCh „Metalchem” w Gliwicach, wyposażonej w ślimak klasyczny (rys. 1) i głowicę wytłaczarską do prętów o przekroju kołowym, urządzenia chłodzącego oraz urządzenia odbierającego. Nie stosowano przy tym urządzenia kalibrującego, aby w wyniku jego działania nie wpływać na efekt Barusa. Używanie procesu autotermicznego w wytłaczarce jednoślindakowej T-32 wymagało dostosowania jej do warunków, w jakich ten proces zachodzi. Konieczne zwiększenie prędkości ślimaka osiągnięto zwiększając przełożenie kinematyczne zębatej przekładni redukcyjnej układu napędowego. Dla potrzeb procesu autotermicznego wentylatory chłodzące strefy funkcjonalne układu uplastyczniającego wytłaczarki musiały być odłączone. Na cylindrze wytłaczarki i głowicy wytłaczarskiej pozostawiono grzejniki pierścieniowe, służące tylko do nagrzewania wstępnego układu uplastyczniającego i głowicy.



Rys. 1. Użyty w badaniach ślimak jednozwojowy do przetworstwa PE-LD

Fig. 1. The single screw used to process LDPE

Ponieważ proces autotermiczny jest procesem, w którym ciepło niezbędne do nagrzania tworzywa i zmiany jego stanu fizycznego powstaje wyłącznie na skutek tarcia, dlatego też układ uplastyczniający wylączarki i głowicy doprowadzano do takiego stanu, w którym grzejniki wszystkich stref tego układu i głowicy samoczynnie się wyłączały. Gdy stan taki utrzymywał się w ciągu określonego czasu, przeprowadzano stosowne pomiary.

Tworzywem wytłaczanym był PE-LD o nazwie handlowej Malen E, oznaczony symbolem FABS, 23-D022 wg PN-89/C-89286/16, produkcji „Petrochemii Płock” SA. Podstawowe właściwości przetwarzanego polietylenu (wg danych producenta) zawiera tabela 1.

Tabela 1. PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI PE-LD FABS, 23-D022, oznaczone wg PN-89/C-89286/16

| Wielkość                                                                   | Wartość |
|----------------------------------------------------------------------------|---------|
| Gęstość w temperaturze 23°C, kg/m <sup>3</sup>                             | 919–923 |
| Masowy wskaźnik szybkości płynięcia, MFR <sub>(190; 2,16)</sub> , g/10 min | 2       |
| Zakres MFR, g/10 min                                                       | 1,6–2,5 |
| Wartość liczbowa efektu Barusa, %                                          | ≤160    |
| Temperatura mięknięcia wg Vicata, °C                                       | ≥90     |
| Napężenie zrywające, MPa                                                   | ≥11     |

Czynnikami badanymi bezpośrednio były:

- masa odcinka pomiarowego wytłoczyny,  $m_w$ , kg;
- długość odcinka pomiarowego wytłoczyny,  $l_w$ , m, w temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- średnica odcinka pomiarowego wytłoczyny,  $d_w$ , m, w temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- czas wytłaczania odcinka pomiarowego wytłoczyny,  $T_p$ , s;
- czas pomiaru energii,  $T_e$ , s;
- zużycie energii całkowitej pobieranej przez wylączarkę,  $E_C$ , kJ;
- zużycie energii biegu jałowego wylączarki,  $E_J$ , kJ;
- zużycie energii układu napędowego wylączarki

(układ przeniesienia napędu z wymontowanym silnikiem),  $E_U$ , kJ;

— temperatura na powierzchni oraz w osi przekroju poprzecznego wytłoczyny opuszczającej dyszę głowicy wylączarskiej, odpowiednio  $t_{WZ}$  oraz  $t_{WS}$ , °C;

— twardość próbek w przekroju poprzecznym,  $HK$ , MPa. Czynniki badanymi pośrednio (czynnikami wynikowymi) były:

— energia i moc cieplna całkowita generowana w tworzywie na skutek tarcia, odpowiednio  $E_G$ , kJ oraz  $\dot{Q}_G$ , W;

— energia i moc cieplna całkowita przenoszona przez tworzywo, odpowiednio  $E_N$ , kJ oraz  $\dot{Q}_N$ , W;

— energia i moc strat całkowita, odpowiednio  $E_S$ , kJ oraz  $\dot{Q}_S$ , W;

— moc całkowita pobierana przez wylączarkę,  $\dot{Q}_C$ , W;

— masowe  $\dot{G}$ , kg/s, i objętościowe  $\dot{W}$ , m<sup>3</sup>/s, natężenie przepływu tworzywa;

— sprawność energetyczna wylączarki,  $\kappa_W$ , %;

— jednostkowe zużycie energii całkowitej,  $E_{JC}$ , J/g;

— masowy wskaźnik szybkości płynięcia próbek MFR, g/10 min;

— skorygowana wartość liczbowa efektu Barusa, LWB:

$$LWB = d_w^2 / d_d^2 \quad (1)$$

gdzie:  $d_d$  — średnica dyszy głowicy wylączarskiej w temp.  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Jako czynniki zmienne przyjęto:

— prędkość kątową ślimaka,  $\omega$ , rad/s, obrotową,  $v$ , s<sup>-1</sup> oraz obwodową,  $V_0$ , m/s (tabela 2):

Tabela 2. PRĘDKOŚĆ ŚLIMAKA NASTAWIANA PODCZAS WYTŁACZANIA I NOMINALNA Szybkość Ścinania Tworzywa

| Czynniki zmienne                                                                                                             |                                 | Poziom wartości |        |        |        |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
|                                                                                                                              |                                 | 1               | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Prędkość ślimaka                                                                                                             | kątowa, $\omega$ , rad/s        | 25,13           | 26,53  | 27,52  | 28,78  | 29,97  |
|                                                                                                                              | obrotowa, $v$ , s <sup>-1</sup> | 4,00            | 4,22   | 4,38   | 4,58   | 4,77   |
|                                                                                                                              | obwodowa, $V_0$ , m/s           | 0,40            | 0,42   | 0,44   | 0,46   | 0,48   |
| Nominalna szybkość ścinania tworzywa w kanale śrubowym strefy dozowania układu ślimakowego, $\dot{\gamma}$ , s <sup>-1</sup> |                                 | 188,96          | 199,35 | 206,91 | 216,35 | 225,33 |

$$v = \omega / 2\pi \quad (2)$$

$$V_0 = \pi D v \quad (3)$$

gdzie:  $D$  — średnica zewnętrzna ślimaka;

— nominalną szybkość ścinania tworzywa w kanale śrubowym strefy dozowania układu uplastyczniającego  $\dot{\gamma}$ , s<sup>-1</sup> (tabela 2):

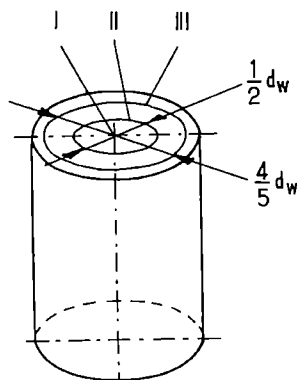
$$\dot{\gamma} = [\pi(D - 2h_{III})v] \cos \alpha / h_{III} \quad (4)$$

gdzie:  $h_{III}$  — głębokość kanału ślimaka,  $\alpha$ , — kąt pochylenia linii śrubowej kanału ślimaka przy rdzeniu;

— temperaturę ustalającą się samoistnie w poszczególnych strefach grzejnych układu uplastyczniającego,  $t_{SI}$ ,  $t_{SII}$ ,  $t_{SIII}$ ,  $t_{SIV}$ , °C;

— temperaturę ustalającą się samoistnie w głowicy wytłaczarskiej,  $t_{SV}$ , °C;

— miejsce pomiaru twardości próbek w ich przekroju poprzecznym (rys. 2).



Rys. 2. Miejsca pomiaru twardości w przekroju poprzecznym próbek oznaczone liczbami I, II, III.

Fig. 2. Hardness measurement points I, II and III on specimen's cross-section

Czynnikami stałymi były:

— elementy geometryczne ślimaka, cylindra, głowicy wytłaczarskiej i urządzeń uzupełniających;

— natężenie przepływu i temperatura wody chłodzącej strefę zasypu układu uplastyczniającego, odpowiednio: 0,08 m<sup>3</sup>/h i 12°C;

— liczba obrotów tarczy licznika energii elektrycznej: 29.

#### BADANIA PROCESU WYTŁACZANIA AUTOTERMICZNEGO

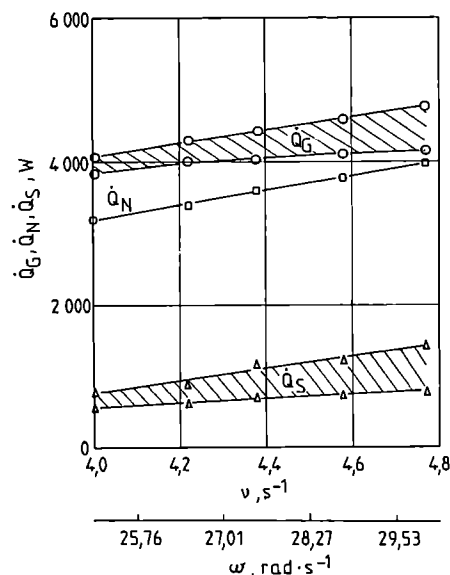
Wyniki badań procesu wytłaczania autotermicznego przedstawiają rys. 3—9.

Zależność mocy cieplnej całkowitej generowanej w tworzywie, mocy cieplnej całkowitej przenoszonej przez tworzywo oraz mocy strat całkowitej od prędkości ślimaka przedstawia rys. 3. W całym zakresie prędkości ślimaka wartości  $\dot{Q}_G$ ,  $\dot{Q}_N$  oraz  $\dot{Q}_S$  wzrastają z różną intensywnością. Większe przyrosty mocy na jednostkę prędkości ślimaka wykazuje moc cieplna całkowita generowana w tworzywie i moc cieplna całkowita przenoszona przez tworzywo, które są w przybliżeniu porównywalne, natomiast moc strat całkowita charakteryzuje się mniejszymi przyrostami.

Obszary zakreskowane, zawarte pomiędzy wartościami granicznymi strumienia ciepła całkowitego generowanego w tworzywie i mocy strat całkowitej, powstały wskutek przyjętego toku obliczeń; obecnie bowiem nie można dokładnie określić wartości  $\dot{Q}_G$  i  $\dot{Q}_S$ , dlatego też obliczając je należało założyć, że wartości niektórych wielkości zmieniają się w określonym zakresie. W kon-

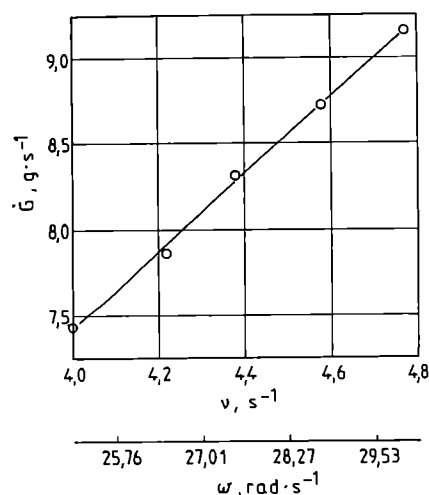
sekwencji otrzymałem wartości maksymalne i minimalne  $\dot{Q}_G$  i  $\dot{Q}_S$  oraz obszary pomiędzy nimi. W warunkach dużej prędkości ślimaka intensywność generowania energii wskutek tarcia rośnie, co może powodować konieczność chłodzenia ślimaka, stref układu uplastyczniającego i głowicy.

Zależność masowego i objętościowego natężenia przepływu tworzywa od prędkości ślimaka w procesie auto-



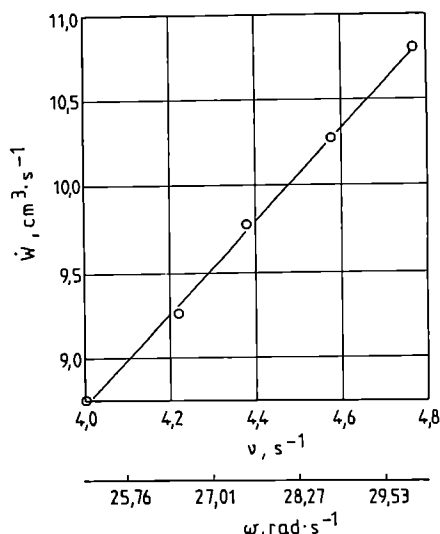
Rys. 3. Zależność mocy cieplnej całkowitej generowanej w tworzywie ( $\dot{Q}_G$ ), mocy cieplnej przenoszonej przez tworzywo ( $\dot{Q}_N$ ) i mocy strat całkowitej ( $\dot{Q}_S$ ) od prędkości obrotowej ( $v$ ) i kątowej ( $\omega$ ) ślimaka

Fig. 3. Total thermal power ( $\dot{Q}_G$ ) generated in, and total thermal power ( $\dot{Q}_N$ ) transferred by, the polymer and total power loss ( $\dot{Q}_S$ ) in relation to the rotational speed ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw



Rys. 4. Zależność masowego natężenia przepływu tworzywa ( $\dot{G}$ ) od prędkości obrotowej ( $v$ ) i kątowej ( $\omega$ ) ślimaka

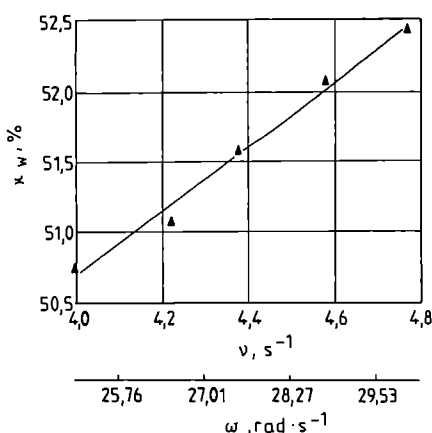
Fig. 4. Polymer mass flow rate ( $\dot{G}$ ) in relation to the rotational speed ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw



Rys. 5. Zależność objętościowego natężenia przepływu tworzywa ( $\dot{W}$ ) od prędkości obrotowej ( $v$ ) i kątowej ( $\omega$ ) ślimaka  
Fig. 5. Polymer volume flow rate ( $\dot{W}$ ) in relation to the rotational speed ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw

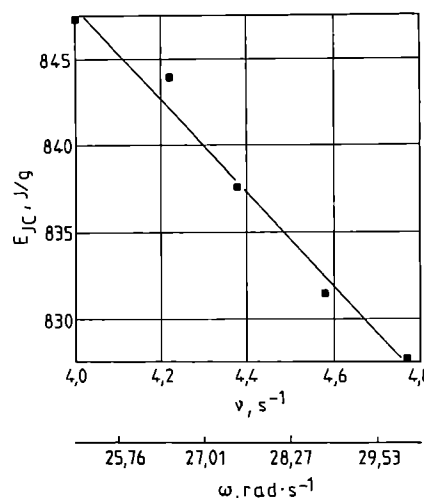
termicznym pokazują rys. 4 i 5. Ze wzrostem prędkości ślimaka powiększają się wartości zarówno  $G$ , jak i  $\dot{W}$ , co jest zjawiskiem łatwym do przewidzenia i znanym w przypadku konwencjonalnego wytłaczania tworzyw.

Zależność sprawności energetycznej wylączarki i jednostkowego zużycia energii całkowitej od prędkości ślimaka przedstawiają rys. 6 i 7. Zwiększająca się prędkość ślimaka powoduje powiększenie wartości  $\kappa_W$  oraz zmniejszenie  $E_{JC}$ . Wraz ze wzrostem prędkości ślimaka rośnie strumień entalpii, co wynika z powiększania się masowego natężenia przepływu tworzywa oraz wzrostu temperatury tworzywa opuszczającego dyszę głowicy, stanowiącego skutek intensywniejszego generowania ciepła tarcia. Ten sposób nagrzewania jest sprawniejszy energetycznie niż nagrzewanie grzejnikami [16, 17]. Ze



Rys. 6. Zależność sprawności energetycznej wylączarki ( $\kappa_W$ ) od prędkości obrotowej ( $v$ ) i kątowej ( $\omega$ ) ślimaka  
Fig. 6. Extruder's energy efficiency ( $\kappa_W$ ) in relation to the rotational speed and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw

wzrostem prędkości ślimaka wzrasta też strumień energii całkowitej, ale wzrost ten jest mniej intensywny, co w efekcie powoduje zwiększenie sprawności energetycznej wylączarki i zmniejszanie się jednostkowego zużycia energii całkowitej. Sprawność energetyczna wylączarki autotermicznej jest, ogólnie biorąc, nieco większa w stosunku do otrzymanej w przypadku wylączarki

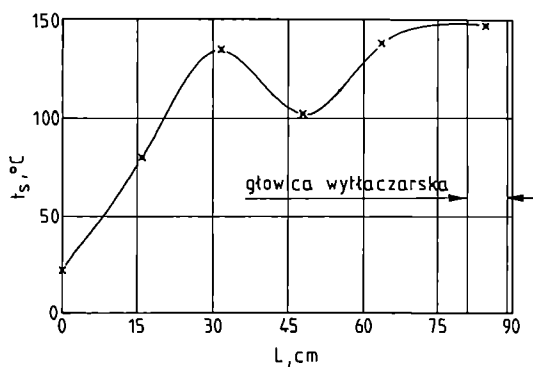


Rys. 7. Zależność jednostkowego zużycia energii całkowitej ( $E_{JC}$ ) od prędkości obrotowej ( $v$ ) i kątowej ( $\omega$ ) ślimaka  
Fig. 7. Total energy consumed per unit mass ( $E_{JC}$ ) in relation to the rotational speed ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw

konwencjonalnej [18]. Ma to znaczenie tylko orientacyjne, gdyż wytłaczanie konwencjonalne prowadzono za pomocą innych wylączarek, innych ślimaków i wobec mniejszych ich prędkości oraz w odmiennych warunkach, często w dużym stopniu zoptymalizowanych [18]. Należy zauważyć, że stosunkowo duże straty energii w badanym obecnie wytłaczaniu autotermicznym powstają w układzie przenoszenia napędu z silnika na wał ślimaka, w który była wyposażona wylączarka stosowana do badań. Względnie małe zmniejszanie się jednostkowego zużycia energii całkowitej ze wzrostem prędkości ślimaka podczas wytłaczania autotermicznego jest zgodne z przebiegiem zależności w warunkach wytłaczania konwencjonalnego [17–19].

Przedstawiony na rys. 8 przebieg rozkładu temperatury wzdłuż układu uplastyczniającego i głowicy, dotyczący określonej prędkości ślimaka, wskazuje na początkowy intensywny wzrost temperatury do wartości ok. 135°C, następny jego spadek do ok. 100°C i znowu dość gwałtowny wzrost do wartości maksymalnej wynoszącej ok. 147°C w końcowym odcinku układu uplastyczniającego; temperatura ta stabilizuje się na tym poziomie w głowicy wylączarskiej. Rozkład temperatury wzdłuż układu uplastyczniającego i głowicy w warunkach innych prędkości ślimaka jest bardzo podobny, przy czym wraz ze wzrostem tej prędkości rośnie jednak temperatura tworzywa przetwarzanego; jest to głównie spowodowane wzrostem strumienia ciepła generowanego na

skutek tarcia tworzywa (rys. 3). Rozkład temperatury wzdłuż układu uplastyczniającego i głowicy jest inny niż w przypadku wytłaczania konwencjonalnego, kiedy to krzywa temperatury po intensywnym wzroście w strefie zasilania przedstawia dalej na ogół linię prostą, łagodnie nachyloną w kierunku osi odciętych [16, 20].



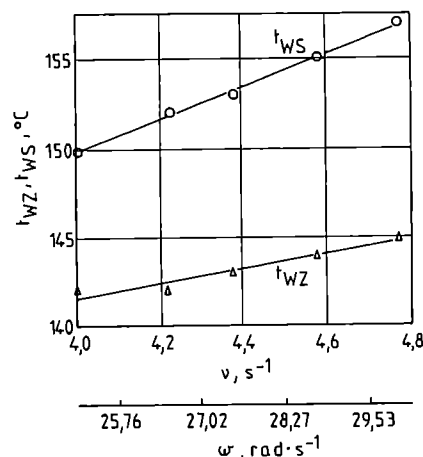
Rys. 8. Przebieg rozkładu temperatury ( $t_s$ ) wzdłuż długości układu uplastyczniającego ( $\alpha$ ) i głowicy wytłaczarskiej, w warunkach prędkości ślimaka  $\omega = 26,51 \text{ rad/s}$  ( $v = 4,22 \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 8. Temperature distribution ( $t_s$ ) along the plasticating system and extruder head, e.g., at angular screw speed  $\omega = 26,51 \text{ rad/s}$  ( $v = 4,22 \text{ s}^{-1}$ )

Temperatura w strefie zasilania i na początku strefy przemiany rośnie aż do temperatury, w której następuje topnienie fazy krystalicznej w całej masie tworzywa przetwarzanego. Ponieważ ta przemiana fazowa jest endotermiczna, temperatura w strefie przemiany zaczyna zmniejszać się, gdyż przetwarzane tworzywo „pobiera” ciepło niezbędne do przemiany fazowej. W chwili, gdy przeważająca ilość fazy krystalicznej ulegnie już stopieniu, temperatura tworzywa ponownie zaczyna rosnąć, gdyż dominującą rolę znowu odgrywa generowanie ciepła tarcia (przede wszystkim wewnętrznego) tworzywa.

Na temperaturę  $t_s$  ma również wpływ mechanizm generowania ciepła i sposób pomiaru temperatury. Otóż w procesie autotermicznym najwięcej ciepła wytwarza się tam, gdzie występuje największe tarcie, zatem przy powierzchni ślimaka, a najmniej tam, gdzie tarcie jest najmniejsze, a więc przy powierzchni cylindra. Przepływ tworzywa w kanale śrubowym układu uplastyczniającego nie zmieniają tego zjawiska, a powodują jedynie dalszy wzrost temperatury i jej ujednolicenie w przekroju poprzecznym kanału. Pomiar temperatury  $t_s$  odbywał się, jak niemal zawsze [16, 17, 21], tuż pod powierzchnią wewnętrzną cylindra; tak więc temperaturę mierzono w obszarze, w którym wytwarza się najmniej ilość ciepła.

Zależność temperatury wytłoczyny opuszczającej dyszę głowicy wytłaczarskiej na powierzchni i w osi przekroju poprzecznego od prędkości ślimaka przedstawia rys. 9. Wartości  $t_{WZ}$  oraz  $t_{WS}$ , jak również różnica pomiędzy nimi, rosną więc ze wzrostem prędkości ślimaka.



Rys. 9. Zależność temperatury wytłoczyny na powierzchni ( $t_{WZ}$ ) i w osi przekroju poprzecznego ( $t_{WS}$ ) od prędkości obrotowej ( $v$ ) i kątovej ( $\omega$ ) ślimaka

Fig. 9. Extrudate temperatures at surface ( $t_{WZ}$ ) and in the transverse cross-section axis ( $t_{WS}$ ) in relation to the rotational speed ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ) of the screw

#### BADANIA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH WYTŁOCZYNY

Wpływ warunków wytłaczania autotermicznego na wybrane właściwości fizyczne wytłoczyny określiłem na podstawie badań masowego wskaźnika szybkości płynięcia, skorygowanej wartości liczbowej efektu Barusa oraz twardości próbek w ich przekroju poprzecznym.

Oznaczanie wartości  $MFR$  starałem się powiązać z ewentualnymi zmianami strukturalnymi w tworzywie, które mogą być wynikiem przemian fizycznych zachodzących podczas przetwórstwa (spowodowanych głównie równoczesnym działaniem naprężeń ścinających, rozciągających oraz temperatury), a powodować utratę pierwotnych właściwości [22, 23, 24]. Wyniki badań  $MFR$ , przeprowadzone wg zaleceń zawartych w [23, 24, 25], zawiera tabela 3. Masowy wskaźnik szybkości płynięcia nieco więc wzrasta wraz ze zwiększaniem szybkości

Tabela 3. NIEKTÓRE WŁAŚCIWOŚCI WYTŁACZANEGO PE-LD

| Właściwości                                                     | Poziom wartości zespołu czynników zmiennych wg tabeli 2 |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                 | 1                                                       | 2     | 3     | 4     | 5     |
| Masowy wskaźnik szybkości płynięcia $MFR_{(190, 210)}$ g/10 min | 2,40                                                    | 2,48  | 2,54  | 2,58  | 2,63  |
| Skorygowana wartość liczbową efektu Barusa $LWB$                | 1,32                                                    | 1,32  | 1,33  | 1,34  | 1,36  |
| Twardość, MPa                                                   | I <sup>*)</sup>                                         | 18,38 | 20,40 | 20,98 | 18,73 |
|                                                                 | II                                                      | 20,47 | 22,80 | 22,82 | 21,87 |
|                                                                 | III                                                     | 18,48 | 19,48 | 20,98 | 19,42 |

\*) Miejsca pomiaru twardości — I, II, III wg rys. 2.

ścinania tworzywa podczas wytłaczania, co może świadczyć bądź o wzroście orientacji molekularnej, bądź też o zmniejszaniu się średniego ciężaru cząsteczkowego związanym z pękaniem łańcuchów makrocząstek.

Skorygowaną wartość liczbową efektu Barusa, obliczoną wg równania (1), również ujęto w tabeli 3. Okazuje się, że zwiększenie prędkości ślimaka, a w związku z tym i nominalnej szybkości ścinania tworzywa, a także, jak wynika z literatury [16, 17, 21, 26], jego ciśnienia, powoduje nieznaczny wzrost skorygowanej wartości liczbowej efektu Barusa pomimo pewnego przyrostu temperatury.

Twardość próbek mierzona w przekroju poprzecznym (tabela 3) zależy zarówno od prędkości ślimaka, jak i od miejsca pomiaru w przekroju poprzecznym próbek. Najmniejsza twardość występuje w osi przekroju poprzecznego próbek (miejsce I, rys. 2). Tu makrocząsteczki przepływające przez dyszę głowicy znajdują się tylko w polu prędkości o gradiencie wzdłużnym, charakteryzującym się lepkością podłużną i będącym w zasadzie polem deformacyjnym [27, 28]. Tworzywo w tym miejscu podlega stosunkowo największej degradacji mechanicznej [23, 26, 29]. Natomiast największa twardość występuje na okręgu o średnicy równej 1/2 średnicy próbek (miejsce II, rys. 2). W tym obszarze występuje pole prędkości o gradiencie złożonym, ze znacznym udziałem składowej poprzecznej, charakteryzowanym lepkością poprzeczną; pole to jest w zasadzie polem przesuwным i w konsekwencji silnie orientującym. Tworzywo bardziej zorientowane molekularnie powinno wykazywać większy opór podczas wciskania w niego kulki pomiarowej.

Na małe (w świetle powyższych rozważań) wartości twardości na okręgu o średnicy równej 4/5 średnicy próbek (miejsce III, rys. 2) zapewne może mieć wpływ odkształcanie się na zewnątrz (na boki) tworzywa w trakcie wnikania w niego kulki pomiarowej, pomimo że obszar ten odznacza się dominującym udziałem pola prędkości o gradiencie poprzecznym i skutkami z tego wynikającymi.

W warunkach najmniejszej prędkości ślimaka (poziom 1) temperatura wytłaczania, mająca rozkład jak na rys. 8, wykazuje najmniejsze wartości. Powoduje to największą lepkość tworzywa, duże opory przepływu i związany z tym znaczny stopień degradacji mechanicznej przetwarzanego materiału, czego konsekwencją jest jego mała twardość. Wraz z powiększaniem się prędkości ślimaka rośnie temperatura wytłaczania, a więc zmniejsza się lepkość tworzywa, zmniejszają się opory przepływu i maleje związany z tym stopień degradacji mechanicznej tworzywa, a w konsekwencji powiększa się twardość. Największej prędkości ślimaka (poziomy 4 i 5) odpowiada najwyższa temperatura wytłaczania, najmniejsza lepkość i najmniejszy opór przepływu, intensyfikują się natomiast przepływy w kanale śrubowym sprzyjające degradacji mechanicznej tworzywa, co powoduje w końcowym efekcie spadek twardości próbek.

## WNIOSKI I USTALENIA

Na podstawie analizy wyników opisanych powyżej badań doświadczalnych procesu wytłaczania autotermicznego PE-LD można sformułować następujące ważniejsze wnioski:

1) Strumień ciepła całkowity generowany na skutek tarcia tworzywa o powierzchnię ślimaka i cylindra, strumień ciepła całkowity przenoszony przez tworzywo, moc strat całkowita, a także sprawność energetyczna wytłaczarki są rosnącymi funkcjami prędkości ślimaka, natomiast jednostkowe zużycie energii całkowitej maleje wraz ze wzrostem prędkości ślimaka.

2) Zwiększenie prędkości ślimaka wpływa korzystnie pod względem energetycznym i, oczywiście, wydajnościowym na proces wytłaczania autotermicznego.

3) Rozkład temperatury wzdłuż układu uplastyczniającego w wytłaczaniu autotermicznym jest odmienny niż w przypadku wytłaczania konwencjonalnego; oznacza to, że w strefie zasilania temperatura rośnie, w strefie przemiany spada, w strefie dozowania znowu rośnie oraz w przybliżeniu stabilizuje się w głowicy wytłaczarskiej.

4) Wytłaczarka konwencjonalna wyposażona w klasyczny ślimak może działać autotermicznie w warunkach mniejszej prędkości ślimaka niż podaje się to w literaturze. Działanie to należy jednak ocenić jako mało efektywne w stosunku do możliwości teoretycznych.

5) Masowy wskaźnik szybkości płynięcia w całym badanym zakresie poziomu zespołu czynników zmiennych mieści się lub nieznacznie przekracza dopuszczalne granice zapewniane przez producenta polietyleny, co świadczy o małym stopniu degradacji mechanicznej PE-LD w trakcie wytłaczania autotermicznego.

6) Skorygowana wartość liczbowa efektu Barusa jest nieduża w całym zbadanym zakresie poziomu wartości zespołu czynników zmiennych; wskazuje to na małą pierwszą różnicę naprężeń normalnych w przetwarzanym tworzywie. Odniesienie się do wartości podawanych przez producenta jest niemożliwe ze względu na brak danych dotyczących sposobu ich oznaczania.

7) Największa twardość próbek w przekroju poprzecznym występuje na okręgu o średnicy równej połowie średnicy próbek, a mniejsze lub zbliżone twardości — w osi próbek i na okręgu o średnicy wynoszącej 4/5 średnicy; wynika to najprawdopodobniej ze stopnia orientacji molekularnej oraz, w mniejszym zakresie, z degradacji mechanicznej tworzywa spowodowanej przepływem.

Z konieczności opisane tu badania doświadczalne dotyczą stosunkowo małego zakresu poziomu wartości zespołu czynników zmiennych. W przypadku rozszerzenia tego zakresu, przede wszystkim w kierunku podniesienia poziomu wartości, można przypuszczać, że zaobserwowane zjawiska byłyby jeszcze wyraźniejsze, tzn. występowałyby większe różnice wartości czynników badanych. Zespół czynników zmiennych wpływa

w większym stopniu na niektóre wielkości charakteryzujące proces wytłaczania autotermicznego, np. na masowe i objętościowe natężenie przepływu tworzywa lub sprawność energetyczną wytłaczarki, a w mniejszym stopniu — na wielkości charakteryzujące wybrane właściwości fizyczne wytłoczyny, np. na jej twardość.

*Artykuł został opracowany na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ramach projektu badawczego KBN nr 560/S2/93/05.*

## LITERATURA

1. Sikora J.: *Polimery* 1994, **39**, 7.
2. Sikora J.: *Polimery* 1997, **42**, 111.
3. Sikora J.: „Badania teoretyczne i doświadczalne procesu wytłaczania autotermicznego poliolefin”, Rozprawa doktorska, Lublin—Wrocław 1995.
4. Sikora J.: „Research of Adiabatic Extrusion Process”, The Polymer Processing Society. École d'Application des Hauts Polymeres. Strasburg (Francja) 1994, 199.
5. Sikora J.: „Autothermal Polymer Extrusion”. The Proceeding of the International Scientific Conference „Advanced Materials and Technologies AMT'95”, Zakopane 1995, 397.
6. Krause G.: *Kunststoffe* 1973, **63**, 667.
7. Lang W., Stockmaier G.: *Plastverarbeiter* 1980, **31**, 573.
8. Planer F. E.: *Wire Ind.* 1975, nr 501, 673.
9. Kruder G. A., Reidnour R. E.: *Plast. Eng.* 1979, **35**, nr 4, 29.
10. Prunk H.: *Wire Ind.* 1993, nr 712, 241.
11. Beck H.: *Papier Kunststoff Verarbeiter* 1970, nr 7, 28.
12. Anonim: *Plast. Mod. Elastomers* 1975, **27**, nr 7, 134.
13. Fisher P.: *Industrie Anzeiger* 1977, **64**, 1227.
14. Prospekt firmy „Paul Kiefel GmbH — Maschinenfabrik — Werk”, Worms.
15. Alpine raport: *Europlast Mon.* 1973, **46**, nr 2, 59.
16. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
17. Rauwendaal Ch.: „Polymer Extrusion”, Hanser Publishers, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork 1986.
18. Sikora R., Tomaszewski J., Śliwa W., Ziemniak J.: *Przegląd Mech.* 1980, **39**, nr 22, 8.
19. Sikora R.: *Polimery* 1987, **32**, 247.
20. Sikora R.: *Polimery* 1996, **41**, 277.
21. Praca zbiorowa: „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik. I Grundlagen. II Extrusionsanlagen” (red. Hansen F., Knappe W., Potente H.), Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1986.
22. Sikora R.: „Tworzywa wielkocząsteczkowe — rodzaje, właściwości i struktura”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1991.
23. Żuchowska D.: „Polimery konstrukcyjne — przetwórstwo i właściwości”, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1993.
24. Żuchowska P.: „Polimery konstrukcyjne”, WNT, Warszawa 1995.
25. PN 93/C-89069.
26. Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
27. Ferguson J., Kembłowski Z.: „Reologia stosowana płynów”, Wydawnictwo MARCUS SC, Łódź 1995.
28. Lenk R. S.: „Rheologie der Kunststoffe”, Carl Hanser Verlag, Monachium 1971.
29. Kowalska B.: „Badania wybranych właściwości cieplnych wytłaczanego polietylenu małej gęstości”, rozprawa doktorska, Lublin—Bydgoszcz 1995.

Otrzymano 3 VI 1996 r.

Stowarzyszenie Polskich Wynalazców i Racjonalizatorów we współdziałaniu z Ministerstwem Zdrowia i Opieki Społecznej oraz z Ministerstwem Gospodarki organizuje w dniach 8—10 października 1997 r. w Ustroniu **Seminarium Naukowo-Szkoleniowe** nt.

## „ZASTOSOWANIE POLIMERÓW W NOWOCZESNYCH TECHNIKACH MEDYCZNYCH”

W programie Seminarium znajdują się referaty przygotowane przez wybitnych specjalistów w tej dziedzinie.

**Koszt uczestnictwa** w wysokości 480,- zł obejmuje 2 noclegi w Sanatorium PP „Uzdrowisko Ustron”, wyżywienie oraz materiały seminaryjne.

Informacji udzielają: doc. dr inż. Zbigniew Wielgosz, tel/fax (022) 633 97 96; mgr inż. Zofia Machowska, tel. (022) 633 95 11 w. 20 44; mgr inż. Andrzej Ciepielski, tel/fax (022) 633 84 82.