

JOACHIM STASIEK

Instytut Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Metalchem Toruń
ul. M. Skłodowskiej-Curie 55, 87-100 Toruń
e-mail: sekretariat@ipts-metalchem.torun.pl

Wpływ konstrukcji dwuślimakowego układu uplastyczniającego na charakterystykę procesu wytłaczania^{*)}

INFLUENCE OF CONSTRUCTIONAL FEATURES OF THE TWIN-SCREW PLASTICIZING SYSTEM ON THE CHARACTERISTIC OF EXTRUSION PROCESS

Summary — The research is focused on the constructional improving of twin-screw co-rotating plasticizing systems by changing the screws' configurations. So the effects of constructional features of such systems on the selected parameters characterizing the process of polypropylene (PP) extrusion, especially on a change of a polymer structure, have been determined. The dependence of extruded PP degradation degree [measured as a change of melt flow rate (MFR) value, Table 4] on the configurations of the screws (Table 2, Fig. 4) has also been evaluated. The changes of the structures of PP compositions containing the additives (e.g. light and thermal stabilizers) have been investigated using DSC (Table 3) and FT-IR (Figs. 5 and 6) methods. It has been found that in the process of discussed co-rotating construction system, the necessity of reaching the required temperature of a polymer during its redrawing to the plasticizing zone, as a result of feeding zone elongation, should be taken into account. Next significant requirement concerns the decrease of drive energy scattering in the plasticizing zone by using of kneading segments supporting the transport and minimization of the channels volume reduction. The assessment (evaluation) of the course of the process of a direct extrusion of PP containing chalk as a filler, dependently on various screws configurations and place of feeding a chalk and chalk amounts, has also been presented. Mechanical properties of the pipes obtained (Table 5, Fig. 8) as well as dispersion degree of the filler in a polymer (Fig. 7) were investigated.

Key words: twin-screw co-rotating plasticizing system, polypropylene extrusion, screw configuration, polymer degradation, mineral filler, direct extrusion of pipes, pipes properties.

WIADOMOŚCI OGÓLNE

W artykule [1] wspomniano o dwóch typach wytłaczarek ślimakowych — zarówno przeciwbieżnych (którym poświęcono właśnie [1]), jak i współbieżnych charakteryzujących się znaczną efektywnością mieszania i powszechnie stosowanych do wytwarzania kompozytów polimerowych. Ten drugi typ wytłaczarek dwuślimakowych stanowi przedmiot niniejszego artykułu.

Efektywność dwuślimakowego układu uplastyczniającego współbieżnego oznacza zdolność tego układu do wytłaczania, z możliwie dużą wydajnością, wytworów o dobrej jakości, w warunkach znacznej sprawności energetycznej procesu [2]. Do kryteriów jakościowych procesu wytłaczania zalicza się przede wszystkim ujednorodnienie cieplne, stopień wymieszania (wzdłużnego i poprzecznego), stopień zdyspergowania, zmiany strukturalne (degradacja) i jakość wytłoczyny.

Segmenty modularne zarówno cylindra, jak i ślimaków, umożliwiają — w wyniku odpowiedniej konfiguracji (tzn. zmiany wzajemnego położenia) poszczególnych segmentów o odmiennej konstrukcji — realizację różnych funkcji układu uplastyczniającego z uwzględ-

^{*)} Wykład wygłoszony w ramach VII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Puszczykowo, 2—5 czerwca 2002 r.

nieniem wymagań technologicznych procesu wytłaczania. Poza tym modularna budowa segmentowa układu uplastyczniającego umożliwia optymalizację konfiguracji kompletnego współbieżnego układu uplastyczniającego (cylinder + ślimaki) lub tylko konfiguracji ślimaków.

Dotychczas nie jest znany pełen opis podstaw teoretycznych procesu uplastyczniania, zwłaszcza procesu mieszania i ujednorodniania (w szczególności cieplnego), oraz zmian strukturalnych zachodzących w tworzywie. Dobrze znane i opisane są natomiast udoskonalone modele matematyczne [3–6] przebiegu procesu wytłaczania, które wymagają jednak znajomości dokładnych danych wejściowych i posiadania doświadczenia praktycznego pomocnego w interpretacji danych wyjściowych. Zarówno w wyborze sposobu prowadzenia procesu wytłaczania, jak i podczas projektowania układu uplastyczniającego przeważa jednak działanie empiryczne wspomagane wybranymi obliczeniami teoretycznymi. W tej sytuacji wydaje się, że dotychczasowy stan opracowań teoretycznych uzasadnia podjęcie odpowiednich badań laboratoryjnych i przemysłowych dotyczących procesów wytłaczania współbieżnego.

Rosnące zastosowanie wytłaczarek dwuślimakowych ze ślimakami średnicy do 380 mm i o prędkości obrotowej $1,7\text{--}20\text{ s}^{-1}$ ($100\text{--}1200\text{ min}^{-1}$) z układami uplastyczniającymi współbieżnymi o modularnej budowie segmentowej, zwłaszcza w liniach do wytwarzania tworzyw i kompozytów polimerowych, w tym także w liniach przetwarzania tworzyw poużytkowych i do bezpośredniego wytłaczania wytworów z kompozytów [7–14], było przyczyną podjęcia opisanych poniżej badań doświadczalnych.

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu cech konstrukcyjnych współbieżnych dwuślimakowych układów uplastyczniających na wybrane wielkości charakteryzujące proces wytłaczania polipropylenu (PP), zwłaszcza na zmiany struktury tworzywa. Do badań wybrano PP ze względu na jego rosnący udział w przetwórstwie, łatwość przetwarzania i możliwości modyfikacji. Przewiduje się, że produkcja PP będzie rosła w najbliższych latach w tempie 6–8% rocznie [15]. Oceniono też wpływ konfiguracji ślimaków na przebieg procesu bezpośredniego wytłaczania rur z PP napelnianego składnikami mineralnymi. Zastosowano ślimaki z klasycznymi segmentami ugniatającymi, tzn. bez uwzględniania segmentów ugniatających o specjalnej konstrukcji [16–21].

Przedstawione w literaturze wyniki badań doświadczalnych dotyczących m.in. degradacji uplastycznianego tworzywa w procesie wytłaczania, obejmują tylko wpływ wybranych warunków uplastyczniania, zwłaszcza szybkości obrotowej ślimaków [22] oraz wpływ budowy elementów konstrukcyjnych segmentów ugniatających o specyficznej konstrukcji [16]. Uzasadnia to podjęcie rozszerzających badań zarówno laboratoryjnych, jak i przemysłowych.

Zmiany struktury PP podczas procesu uplastyczniania

PP jest polimerem mało odpornym na działanie tlenu i podwyższonej temperatury, co jest spowodowane obecnością w łańcuchu trzeciorzędowego atomu węgla [23]. Ma to istotne znaczenie w procesie jego przetwarzania, tj. w wytłaczaniu z granulowaniem, podczas którego PP w postaci proszku wraz ze środkami pomocniczymi jest uplastyczniany w atmosferze obojętnej. Degradacja PP powoduje zmiany ciężaru cząsteczkowego, które z kolei wywołują zmiany lepkości w stanie stopionym; te ostatnie zmiany można określić mierząc wskaźnik szybkości płynięcia (*MFR*).

Degradacja PP w procesie uplastyczniania może być spowodowana oddziaływaniami mechaniczno-cieplnymi na tworzywo lub wpływem czynników chemicznych, np. tlenu. Czynniki determinujące stopień degradacji tworzywa to m.in. [23, 24]:

- czas przebywania w układzie uplastyczniającym;
- lokalne wartości temperatury i jej rozkład wzdłuż strefy intensywnego uplastyczniania;
- intensywność odkształcania, zwłaszcza w strefie wstępnego uplastyczniania;
- obecność tlenu i innych czynników chemicznych;
- skład środków pomocniczych, w tym stabilizatorów.

Wpływ pierwszych trzech z wymienionych czynników na degradację PP zależy w istotny sposób od rozwiązania konstrukcyjnego układu uplastyczniającego oraz warunków prowadzenia tego procesu. Natomiast na czynnik czwarty, np. tlen, można wpływać dzięki zastosowaniu atmosfery obojętnej w zasobniku układu uplastyczniającego. Wpływ środków pomocniczych na degradację PP nie był przedmiotem niniejszej pracy.

Bezpośrednie wytłaczanie rur z tworzywa napelnionego

Aby uzyskać określone właściwości tworzyw polimerowych coraz częściej stosuje się ich modyfikację fizyczną np. na drodze dodawania innych tworzyw, względnie wprowadzania napelniacza [25–33]. Odpowiedni dobór składników mieszaniny i sposobu jej otrzymywania pozwala na sterowanie właściwościami oraz na dostosowanie kompozytów tworzywowych do zapotrzebowania rynku.

Kompozyty polimerowe wytwarza się w specjalnych liniach technologicznych charakteryzujących się dużą efektywnością mieszania. Ich budowa, działanie, spełniane funkcje, stopień automatyzacji, a także koszty inwestycyjne i eksploatacyjne są bardzo zróżnicowane. Jednym z zasadniczych urządzeń linii jest zwykle współbieżna wytłaczarka dwuślimakowa. Umożliwia ona wprowadzanie napelniaczy do tworzywa już uplastycznionego, co jest zwłaszcza istotne w przypadku stosowania napelniaczy o silnym działaniu ściernym.

Zaletę wytłaczania bezpośredniego (tj. z pominięciem procesu granulowania) wytworów z tworzywa napełnianego stanowi obniżenie kosztów wytwarzania (w szczególności zmniejszenie zużycia energii i czasu wytwarzania) oraz wzrost jakości wytworu w wyniku ograniczenia obciążenia cieplnego tworzywa [10–13, 34]. Do wad wytłaczania bezpośredniego należy zaliczyć zarówno wyższe koszty inwestycyjne zakupu linii, jak również ostrzejsze wymagania w zakresie doboru warunków prowadzenia takiego procesu. Obecnie techniką wytłaczania bezpośredniego z napełnianych poliolfen wytwarza się przede wszystkim rury, profile oraz płyty. Pozwala to np. na obniżenie kosztów produkcji rur kanalizacyjnych z PP napełnianego kredą (30–50% mas.) o ok. 10%, a w przypadku rur z PVC — o ok. 20% [11].

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały

Badania procesu granulowania polipropylenów dotyczyły wytwarzanych w PKN Orlen SA odmian homopolimerów polipropylenu izotaktycznego typu „Malen P”, mianowicie PP o symbolu F-401 [$MFR_{(230; 2,16)} = 2,4\text{--}3,2$ g/10 min] oraz o symbolu S-702 ($MFR = 11\text{--}16$ g/10 min).

Do badań konfiguracji ślimaków użyto również PP F-401 o ściśle określonej wartości $MFR = 2,8$ g/10 min; miał on postać granulek o barwie naturalnej.

Do scharakteryzowania procesu wytłaczania rur z tworzyw napełnianych i określenia czynników wpływających na jego stabilność wykorzystano następujące materiały:

— polipropyleny: kopolimery blokowe typu o symbolu GEA 6100 i HTM 6100 firmy Montel oraz o symbolu B202E firmy Borealis;

— napełniacze: nieaktywowany syntetyczny węglan wapnia firmy Soda Mątwy SA; aktywowany wypełniacz kredowy firmy Piotrowice oraz talk firmy Naintsch o symbolu SE-Micro oraz firmy Mondo o symbolu Finntalc M15;

— środki pomocnicze: „Ergoterm S.C.” (środek smarny, stabilizator), „Ergowax GS” (środek smarny) firmy Boryszew SA oraz „Armoslip CP” (środek smarny) firmy Ampacet.

Metodyka badań

Badania rozpoznawcze — proces granulowania

Badania rozpoznawcze wykonane w PKN Orlen SA dotyczyły przemysłowego procesu wytłaczania z granulowaniem PP. Polimer w postaci proszku (otrzymywany w procesie polimeryzacji zawieszinowej) transportowano do zasobnika układu uplastyczniającego w atmosferze azotu. Do zasobnika wprowadzano także środki pomocnicze.

Proces granulowania realizowano jednocześnie w dwóch różniących się konstrukcyjnie liniach technologicznych:

— Dwustopniowej, firmy Japan Steel Works (Japonia) [25] (oznaczenie L1), z rozdzielonym etapem uplastyczniania i dozowania stopionego tworzywa do układu granulowania. Podstawowymi urządzeniami linii była dwuślimakowa przeciwbieżna mieszarka intensywna o niezazębiających się ślimakach typu CIM-320 (średnica ślimaków 320 mm) i wytłaczarka jednoślimakowa typu P 305-18 SW (średnica ślimaka 305 mm).

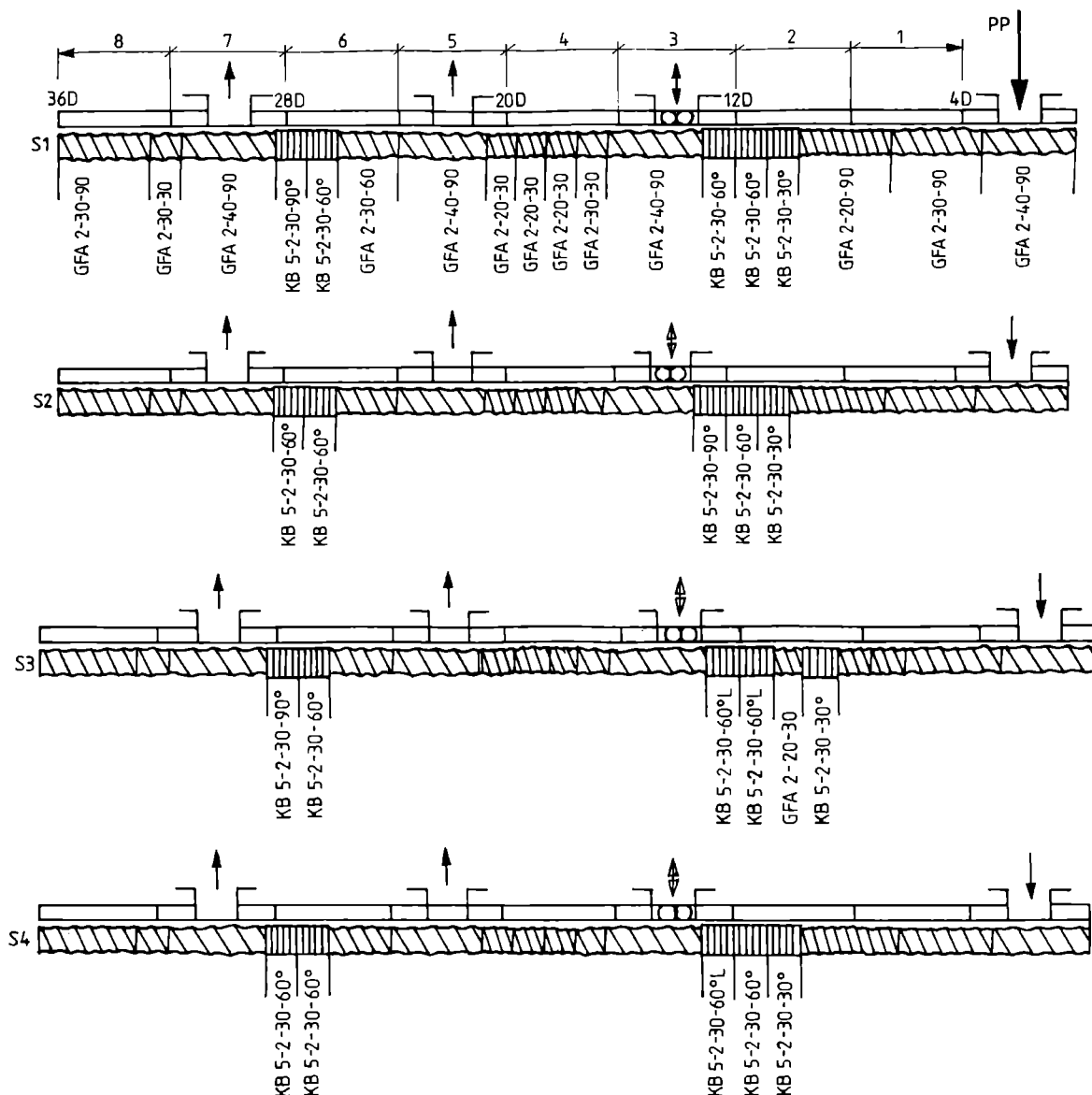
— Jednostopniowej [35], firmy Berstorff (Niemcy) (oznaczenie L2), składającej się ze współbieżnej wytłaczarki dwuślimakowej z odgazowaniem typu ZE 130A (28D) z analogicznym układem granulowania jak w linii L1.

Dwustopniowe układy uplastyczniające linii L1 — ze względu na mniejsze wartości szybkości odkształcenia postaciowego tworzywa w procesie uplastyczniania, a następnie jego przetłaczania do głowicy (duża głębokość kanałów ślimaków zarówno dwuślimakowej mieszarki intensywnej, jak i wytłaczarki jednoślimakowej w porównaniu z głębokością kanału współbieżnej wytłaczarki dwuślimakowej, w której występują wąskie szczeliny międzywojowe) — powodują ograniczoną degradację PP, tj. mniejszy spadek MFR w porównaniu z degradacją w układach jednostopniowych z zastosowaniem współbieżnej wytłaczarki dwuślimakowej. Analiza dotychczasowych wyników badań eksploatacyjnych wskazuje, że rozwiązania konstrukcyjne współbieżnych układów wytłaczania z granulowaniem wywierają znaczny wpływ na stopień degradacji występujący podczas przetwarzania PP o małej wartości MFR , czyli PP F-401. Degradacja PP S-702 (większa wartość MFR) jest natomiast stosunkowo niewielka. Na tej podstawie podjęto badania doświadczalne w celu modyfikacji konfiguracji układu uplastyczniającego wytłaczarki współbieżnej linii L2 w celu zmniejszenia degradacji PP F-401 do poziomu występującego w linii L1.

Badania laboratoryjne — konfiguracja ślimaków

Badania wpływu konfiguracji ślimaków wytłaczarki współbieżnej na stopień degradacji granulowanego PP [36] wykonano za pomocą wytłaczarki laboratoryjnej „Micro 27/GL” firmy Leistritz (Niemcy) (charakterystykę układu uplastyczniającego zawiera tabela 1 — patrz dalszy tekst) zainstalowanej w linii technologicznej wytłaczania z granulowaniem na zimno. Badania wykonano stosując 10 konfiguracji ślimaków z odgazowaniem. Wybrane konfiguracje ślimaków przedstawia rys. 1, a warunki wytłaczania tabela 2.

Polipropylen wytłaczano w następujących warunkach — temperatura stref grzejnych cylindra 260–230°C, temperatura głowicy 230°C, szybkość obrotowa ślimaka 8,3 s⁻¹ (500 min⁻¹). Wytłaczarkę zasilano polipropylenem (F-401, $MFR = 2,8$) w postaci granulatu, ze stałą wydajnością 30 kg/h. Po uzyskaniu wymaganych wartości temperatury, uruchamiano silnik wytłaczarki, nas-



Rys. 1. Schematy konstrukcji układów uplastyczniających współbieżnej wytłaczarki dwuślimakowej typu MICRO 27 firmy Leistritz; S1 — ślimak z trzema strefami odgazowania i dwoma odcinkami segmentów ugniatających; S2 — ślimak o konfiguracji jak S1 z tym, że w odcinkach segmentów ugniatających dokonano wzajemnej wymiany segmentów oznaczonych symbolami KB-5-2-30-90° oraz KB-5-2-30-60°; S3 — ślimak o konfiguracji jak ślimak S1 z tym, że w pierwszym odcinku segmentów ugniatających w strefie wstępnego uplastyczniania dokonano zmiany dwóch segmentów ugniatających na segmenty o analogicznej konstrukcji (KB-5-2-30-60°L), ale o lewym kierunku pochylenia pozornej linii śrubowej elementów krzywkowych (charakteryzujących się wstępnym kierunkiem transportowania tworzywa) z jednoczesną zmianą położenia trzeciego segmentu ugniatającego; S4 — ślimak o konfiguracji jak ślimak S2 z tym, że zmieniono jeden segment ugniatający o symbolu KB-5-2-30-90° na KB-5-2-30-60°L, wywołujący większe dławienie przepływu tworzywa; GFA — dwuzwojowe segmenty transportujące; cyfry: pierwsza — liczba zwoi, druga — skok uzwojenia, trzecia — długość segmentu; KB — segmenty ugniatające; cyfry: pierwsza — liczba elementów krzywkowych (tarcz), druga — liczba garbów krzywek, trzecia — długość segmentu, czwarta — kąt między osiami symetrii krzywek; litera — kierunek pochylenia pozornej linii śrubowej elementów krzywkowych (kierunek lewy — L, kierunek prawy — brak litery); 1—8 — kolejne strefy grzejno-chłodzące cylindra

Fig. 1. Schemes of plasticizing construction systems of the co-rotating twin-screw extruder type Micro 27 by Leistritz. S1 — screw with three degassing zones and two sections of kneading segments. S2 — screw with configuration like S1 but in the sections of kneading segments the interchange of the segments marked as KB-5-2-30-90° and KB-5-2-30-60° has been done. S3 — screw of configuration like S1 but in the first section of kneading segments in the preliminary plasticizing zone the following changes have been done: two kneading segments were replaced by analogously constructed ones (KB-5-2-30-60°L), but of left direction of an apparent screw line inclination of the cam elements (characterized by back direction of the transport of a polymer) with simultaneous change of the third kneading segment position. S4 — screw of configuration like S2 but one kneading segment (KB-5-2-30-90°) was replaced with KB-5-2-30-60°L one, causing bigger throttling of polymer. GFA — two-winding transporting segments, digits: first one — number of turns of winding, second one — winding pitch, third one — the length of a segment. KB — kneading segments, digits: first one — number of cam elements, second one — number of cams (disks) lobes, third one — the length of a segment, fourth one — an angle between the cams symmetry axes, letter — inclination of the apparent screw line of cam elements (L — left, missing letter — right). 1—8 successive heating-cooling zones of a cylinder

tępnie grawimetryczny układ dozujący oraz urządzenie granulujące i wytłaczano tworzywo w postaci żyłek. Stabilizacja cieplna wytłaczarki następowała po ok. 20 min, natomiast stabilizacja całego procesu wytłaczania z granulowaniem następowała po ok. 30 min. Pomiarów wykonywano po 30 min oraz 45 min przebiegu procesu granulowania.

Masowy wskaźnik szybkości płynięcia

Wartość $MFR_{(230; 2,16)}$ oznaczano za pomocą plastoimetru firmy CEAST S.p.A. (Włochy) z przystawką komputerową, w temp. 230°C, pod obciążeniem 2,16 kg, zgodnie z ISO 1133:1997. Wyniki oznaczają MFR stanowią wartości średnie z 10 pomiarów; odchylenie standardowe nie przekraczało $\pm 6\%$ wartości MFR .

Stopień degradacji PP (ΔMFR) obliczano jako różnicę między wartościami MFR granulatu otrzymanego w linii laboratoryjnej i granulatu pierwotnego bezpośrednio z procesu granulowania.

Badania przemysłowe

Celem badań przemysłowych było opracowanie zmodyfikowanej konfiguracji współbieżnego układu uplastyczniającego linii L2 z uwzględnieniem minimalizacji wspomnianej już degradacji PP w procesie jego wytłaczania z granulowaniem do poziomu uzyskiwanego w linii L1 z identycznym zestawem środków pomocniczych, w tym stabilizatorów wprowadzanych w procesie granulowania polimeru.

Uwzględniając fakt, że badania laboratoryjne wykonano w wytłaczarce, której średnica ślimaków jest ponad pięciokrotnie mniejsza od średnicy ślimaków wytła-

czarki przemysłowej (tabela 1 — znaczna różnica w szybkości ścinania tworzywa), a poza tym wytłaczarkę laboratoryjną zasilano granulatem PP z wprowadzonymi już (w fazie jego wytwarzania) środkami pomocniczymi, przeprowadzonych badań laboratoryjnych nie można traktować jako w pełni modelowych. Można je natomiast uważać za badania układów wykazujących określoną analogię fizyczną z układami stosowanymi na etapie granulacji, a więc pozwalających na bliższe poznanie procesu współbieżnego uplastyczniania dwuślimakowego i wstępne określenie wpływu wybranych elementów konfiguracji ślimaków na degradację PP o małych wartościach MFR .

Do badań przemysłowych posłużyła linia do wytłaczania z granulowaniem PP obejmująca współbieżną wytłaczarkę dwuślimakową z odgazowaniem typ ZE 130A (28D) firmy Berstorff (Niemcy). Do zasobnika wytłaczarki za pomocą dozowników grawimetrycznych wprowadzano w atmosferze azotu PP w postaci proszku (ϕ ok. 0,3 mm) wraz ze środkami pomocniczymi. Temperatura stref grzejnych cylindra wynosiła od 270°C do 230°C, temperatura głowicy 240°C, natomiast wydajność wytłaczania ok. 3000 kg/h. Otrzymywano PP w postaci granulek (4×3 mm).

Uwzględniając dużą wydajność linii granulacyjnej, wymagany bardzo długi czas stabilizacji całego procesu wytłaczania z granulowaniem wynoszący ok. 50 h i związane z tym wysokie koszty takich prób eksploatacyjnych przyjęto, że zmiany konfiguracji układu uplastyczniającego powinny charakteryzować się niskim poziomem ryzyka dotyczącego ewentualnego pogorszenia jakości granulatu w porównaniu z granulatem wytwarzanym przy użyciu standardowego układu uplastyczniającego. Powyższe założenia wymagały większej liczby zmian konfiguracji, zwłaszcza konfiguracji ślimaków; realizowano je podczas planowanych przeglądów technicznych lub technologicznych. Pomiarów badanych czynników wykonywano po ustabilizowaniu procesu w odstępach 2 h w ciągu 2 tygodni ciągłej pracy linii technologicznej.

Stopień degradacji PP (ΔMFR) obliczono jako różnicę między wartościami MFR granulatu otrzymanego jednocześnie w linii L2 i granulatu w linii L1.

Konfiguracje ślimaków

W toku opracowywania modyfikacji konfiguracji ślimaków uwzględniano wnioski z badań laboratoryjnych. Kolejne modyfikacje standardowych konfiguracji ślimaków obejmowały przede wszystkim:

- wydłużenie strefy zasilania;
- umieszczenie w strefie wstępnego uplastyczniania po segmentach ugniatających segmentu transportującego o zdolności transportowania tworzywa podobnie, jak w strefach wstępnego sprężania i podgrzewania;
- umieszczenie w strefie intensywnego uplastyczniania segmentów ugniatających na przemian wspomagających i dławiących transport;

T a b e l a 1. Elementy geometryczne charakteryzujące badane układy uplastyczniające [36] oraz warunki wytłaczania PP F-401
T a b l e 1. Geometric elements characterizing the investigated plasticizing systems [36] and conditions of PP F-401 extrusion

	Typ wytłaczarki współbieżnej	
	Micro 27	ZE 130A (28D)
Postać tworzywa wprowadzanego do zasobnika wytłaczarki	granulat	proszek z reaktorów polimeryzacji + środki pomocnicze
Elementy geometryczne ślimaków		
Średnica, mm	27	140
Całkowita długość, L/D	36	28
Głębokość kanałów, mm	4,4	22,5
Warunki wytłaczania		
Maksymalna szybkość obrotowa, s ⁻¹	8,3	5
Prędkość obwodowa ślimaków, m/s	0,7	2,2
Moc napędu, kW	10,5	1000
Szybkość ścinania tworzywa:		
— kanał ślimaka, s ⁻¹	160	100
— szczelina czołowa, s ⁻¹	3000	2500
Średni czas przebywania tworzywa w cylindrze, s	19	17
Wydajność wytłaczania, kg/h	30	3000

— zastosowanie w strefie wstępnego sprężania i podgrzewania elementów mieszających.

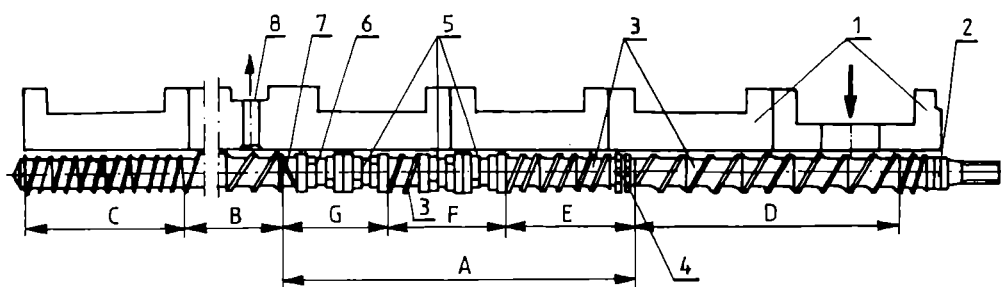
Poza tym badano wpływ na stopień degradacji PP (ΔMFR) zmiany położenia otworu odgazowania w kierunku wytłaczania w wyniku zaślepienia odpowiedniego otworu w cylindrze, co umożliwiło wydłużenie stref zasilania i uplastyczniania ślimaków, oraz korzystniejszy dobór warunków prowadzenia procesu wytłaczania z granulowaniem, zwłaszcza temperatury stref grzejnych cylindra oraz szybkości obrotowej ślimaków.

Badania wykonano stosując 6 podstawowych konfiguracji układów uplastyczniających z odgazowaniem cylindra. Schemat zmodyfikowanego układu uplastyczniającego z odgazowaniem cylindra spełniającego najkorzystniejsze wymagania dotyczące minimalizacji ΔMFR ilustruje rys. 2 [37]. Wspomniane już korzystne

przyspieszają proces końcowego uplastycznienia. Części lotne są usuwane z tworzywa poprzez otwór cylindra wytłaczarki. Uplastycznione i odgazowane tworzywo jest przetłaczane do strefy dozowania, a następnie do głowicy granulującej.

Badanie struktury

Do oceny przemian strukturalnych zachodzących w przetwarzanym PP zastosowano podczas procesu jego granulowania w linii L1 i L2 metodę różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) oraz spektroskopię FT-IR. Pomiary metodą DSC prowadzono za pomocą aparatu PL DSC (Polymer Laboratories, W. Brytania) w warunkach przepływu strumienia azotu nad próbką ($1 \text{ cm}^3/\text{min}$), stosując szybkości ogrzewania i chłodzenia $10 \text{ deg}/\text{min}$. Do badań spektroskopowych wyko-



Rys. 2. Schemat zmodyfikowanego współbieżnego dwuślimakowego układu uplastyczniającego z odgazowaniem: 1 — cylinder, 2 — ślimak, 3 — segmenty transportujące, 4 — segmenty mieszające, 5 — segmenty ugniatające, 6 — segment ugniatający dławiący, 7 — segment transportujący dławiący, 8 — otwór odgazowania; strefy ślimaków: A — uplastyczniania, B — odgazowania, C — dozowania, D — zasilania, E — wstępnego sprężania i podgrzewania, F — wstępnego uplastyczniania, G — intensywnego uplastyczniania

Fig. 2. Scheme of the modified co-rotating twin-screw plasticizing system with degassing: 1 — cylinder, 2 — screw, 3 — transporting segments, 4 — mixing segments, 5 — kneading segments, 6 — throttling kneading segment, 7 — throttling transporting segment, 8 — degassing hole; screws zones: A — plasticizing, B — degassing, C — dosing, D — feeding, E — preliminary compressing and heating up, F — preliminary plasticizing, G — intensive plasticizing

wydłużenie strefy zasilania i uplastyczniania ślimaków wynosi łącznie ok. $2,5D$. W strefie sprężania i podgrzewania ślimaków zastosowano segmenty mieszające, które zapewniają odpowiedni stopień wymieszania proszku PP ze środkami pomocniczymi.

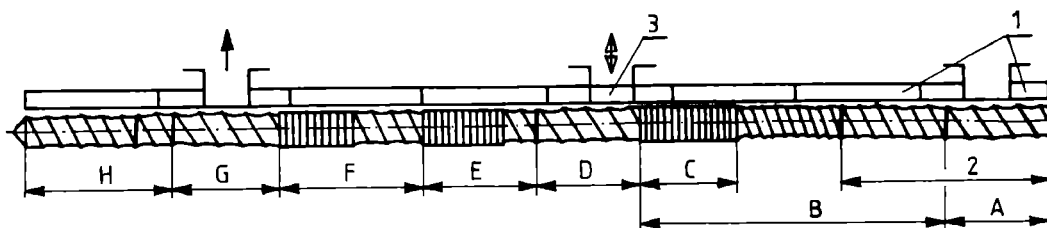
Tworzywo jest transportowane z jednoczesnym jego nagrzewaniem do strefy wstępnego sprężania i podgrzewania, gdzie podlega wymieszaniu za pomocą segmentów mieszających, następnie sprężaniu oraz nagrzananiu. Po osiągnięciu temperatury mięknięcia tworzywo jest przemieszczane do strefy wstępnego uplastyczniania, w której następuje jego częściowe uplastycznienie. Niecałkowite wypełnienie tworzywem segmentów ugniatających zrealizowano umieszczając segment transportujący na końcu tej strefy. Wstępnie uplastycznione tworzywo jest transportowane do strefy intensywnego uplastyczniania, gdzie w związku z jej całkowitym wypełnieniem tworzywem (zwłaszcza dzięki umieszczeniu elementu transportującego dławiącego tworzywo) podlega ono znacznym naprężeniom ścinającym, które

rzystano widmo FT-IR zarejestrowane za pomocą spektrometru „Spectrum 2000” firmy Perkin-Elmer z przysławką refleksyjną.

Wytłaczanie rur z napełnionego tworzywa

Rury średnicy 110 mm ze ściankami grubości 2,6–3,2 mm z napełnianego PP wytłaczano w linii technologicznej ze współbieżną wytłaczarką dwuślimakową typu 2T70W produkcji IPTS Toruń (średnica ślimaków — 70 mm, długość robocza — $37D$) z odgazowaniem cylindra i bocznym dozowaniem napełniacza (kredy) do uplastycznionego PP (rys. 3). Odpowiednie dozowanie PP i środków pomocniczych oraz dozowanie kredy zapewniał układ dozowników grawimetrycznych firmy Schenck (Niemcy). Stabilne przetłaczanie uplastycznionej kompozycji do głowicy było możliwe dzięki użyciu pompy zębatej firmy OMC (Włochy).

Badania wykonano w różnych konfiguracjach ślimaków i w rozmaitych warunkach napełniania oraz wytłaczania PP. Temperaturę (w zakresie $180\text{--}220^\circ\text{C}$) po-



Rys. 3. Schemat układu uplastyczniającego współbieżnej wylączarki dwuślimakowej 2T70W: 1 — segmenty cylindra, 2 — segmenty ślimaka, 3 — obszar podawania bocznej kredy; strefy ślimaka: A — zasilenia, B — uplastyczniania, C — intensywne uplastyczniania, D — odgazowania swobodnego, E, F — intensywne mieszania kompozytu, G — odgazowania próżniowego, H — dozowania

Fig. 3. Scheme of plasticizing system of co-rotating twin-screw extruder 2T70W: 1 — cylinder segments, 2 — screw segments, 3 — side feeding of chalk area; screw zones: A — feeding, B — plasticizing, C — intensive plasticizing, D — free degassing, E, F — intensive mixing of a composite, G — vacuum degassing, H — dosing

szczególne strefy układu uplastyczniającego wylączarki, pompy zębatej i głowicy do formowania rury, a także obroty ślimaków ($100\text{--}400\text{ min}^{-1}$) ustalano w zależności od ilości dozowanych składników i szybkości obrotowej ślimaków. Szybkość obrotową pompy zębatej dobierano w zależności od wartości temperatury i ciśnienia stopionego napełnionego PP mierzonych na końcu ślimaków wylączarki (zalecane ciśnienie na dolocie do pompy zębatej $2\text{--}6\text{ MPa}$).

Do pomiarów właściwości mechanicznych w warunkach rozciągania stosowano zrywarke „Tiratest 2160” (prędkość przesuwu szczęk 100 mm/min); udurowienie z karbem według Izoda w temp. 0°C i -20°C określano za pomocą młota zinstrumentalizowanego. Znormalizowanymi metodami badano również odporność na uderzenia w temp. 0°C , sztywność obwodową oraz chropowatość powierzchniową rur. Stopień zdyspersjonowania napełniacza w tworzywie oceniano na podstawie zdjęć przełamów próbek rur wykonanych za pomocą mikroskopu skaningowego.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Analizę wyników badań doświadczalnych ułatwiają uproszczone zależności teoretyczne odnoszące się do generacji energii cieplnej w stopionym tworzywie. Strumień energii cieplnej (\dot{Q}) generowany w tworzywie w kanałach ślimaków strefy uplastyczniania [38, 39] (w wyniku tarcia wewnętrznego w toku laminarnego i izotermicznego przepływu tworzywa będącego płynem newtonowskim) określa zależność:

$$\dot{Q} = V \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

gdzie: V — objętość kanałów ślimaków strefy uplastyczniania wypełnionych tworzywem, η — średnia lepkość stopionego tworzywa, $\dot{\gamma}$ — średnia szybkość ścinania.

Wynika z niej, że na wartość \dot{Q} wpływa średnia lepkość tworzywa, szybkość obrotowa ślimaków i długość kanałów ślimaków strefy uplastyczniania wypełnionych tworzywem.

Proces granulowania

Badania procesu wytłaczania z granulowaniem PP z zastosowaniem różnych konfiguracji ślimaków (tabela 2) wskazują, że znaczny wpływ na stopień degradacji tworzywa ma przede wszystkim rodzaj i liczba zastosowanych segmentów ugniatających w strefie wstępnego uplastyczniania ślimaków, tj. na odcinku ślimaka gdzie tworzywo (ze względu na temperaturę) charakteryzuje się największą lepkością.

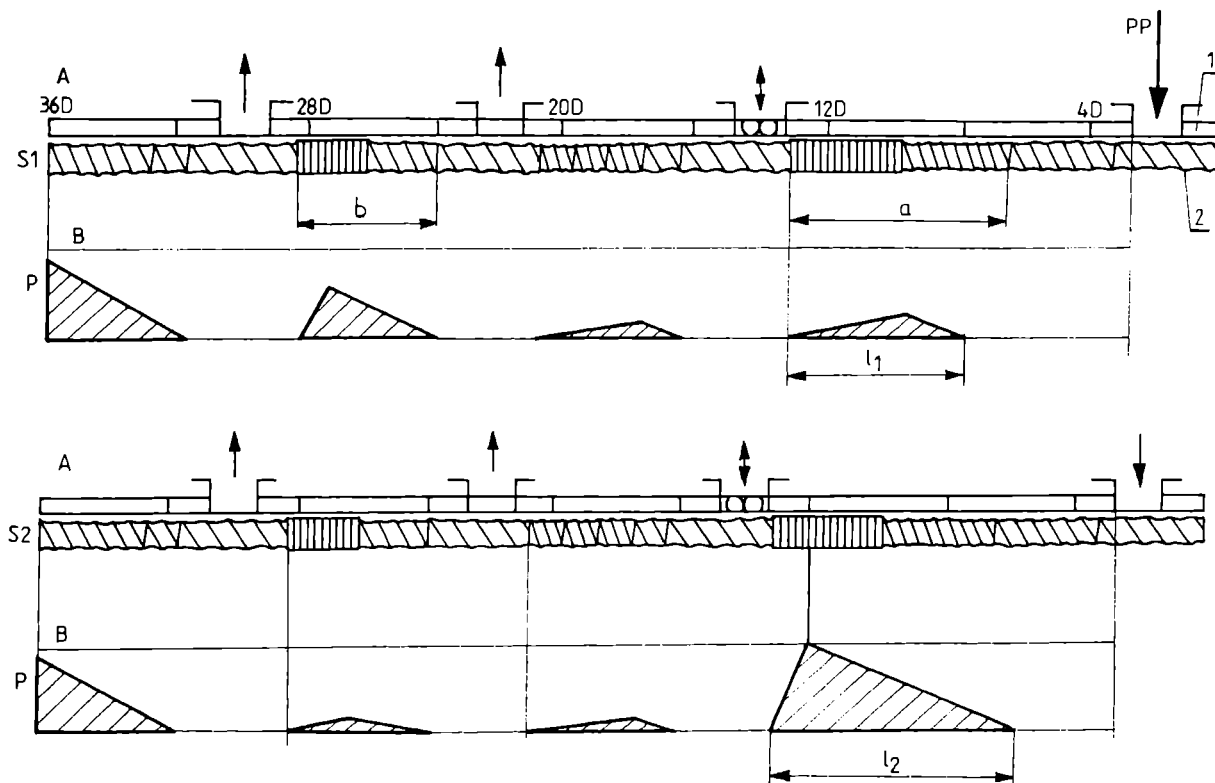
T a b e l a 2. Wybrane warunki wytłaczania z granulowaniem PP F-401 z zastosowaniem różnych konfiguracji ślimaków — wylączarka Micro 27

T a b l e 2. Selected conditions of extrusion with granulating of PP F-401 with using various screws configurations — extruder Micro 27

Symbol konstrukcji ślimaka (por. rys. 1)	Parametry tworzywa na końcu ślimaków		Jednostkowe zużycie energii układu napędu ślimaków J/g	Stopień degradacji (ΔMFR)
	temperatura $^{\circ}\text{C}$	ciśnienie MPa		
S1	234	4,0	500	0,13
S2	229	3,9	540	0,66
S3	236	3,5	610	0,87
S4	231	3,6	580	0,92

Zastosowanie segmentów niewspomagających transportu lub silnie dławiących przepływ zwiększa spiętrzenie ciśnienia. Widać to na przykładzie ślimaków S2, S3 i S4, gdzie na końcu strefy wstępnego uplastyczniania ślimaka dokonano następujących modyfikacji:

— Na ślimaku S2 został umieszczony segment ugniatający, tzw. neutralny, o symbolu KB-5-2-30-90 $^{\circ}$ (tj. o elementach krzywkowych obróconych względem siebie o 90°) charakteryzujący się brakiem wspomaganie transportu tworzywa. Segment ten powodował w procesie wytłaczania wzrost ciśnienia tworzywa na końcu strefy wstępnego uplastyczniania (rys. 4, strefa a), a w efekcie



Rys. 4. Schematy konstrukcyjnych rozwiązań układów uplastyczniających wylączarki laboratoryjnej MICRO 27 (A) oraz modelowe rozkłady ciśnień (p) wzdłuż ślimaków S1 i S2 (B): 1 — segmenty cylindra długości $4D$, $D = 27$; 2 — ślimaki S1 i S2 (oznaczenia segmentów ślimaków wg rys. 1); a — długość strefy wstępnego uplastyczniania, b — długość strefy uplastyczniania, l_1 — długość odcinka strefy wstępnego uplastyczniania ślimaka S1 wypełnionego całkowicie tworzywem, l_2 — długość odcinka strefy wstępnego uplastyczniania ślimaka S2 wypełnionego całkowicie tworzywem

Fig. 4. Schemes of constructional solutions of plasticizing systems of laboratory extruder MICRO 27 (A) and model pressure (p) distributions along the S1 and S2 screws: 1 — cylinder segments of the length $4D$, $D = 27$, 2 — S1 and S2 screws (screws segments designations as in Fig. 1); a — the length of preliminary plasticizing zone, b — the length of plasticizing zone, l_1 — the length of the fragment of preliminary plasticizing zone of S1 screw fulfilled with plastic material, l_2 — the length of the fragment of preliminary plasticizing zone of S2 screw fulfilled with plastic material

wzrost wartości MFR w porównaniu ze ślimakiem S1 zawierającym segment tzw. prawy o symbolu KB-5-2-30-60°, tj. wspomagający transport tworzywa. Strumień ciepła w strefie wstępnego uplastyczniania generowany w przypadku zastosowania ślimaka S2 jest znacznie większy niż w ślimaku S1 ($\dot{Q}_2 > \dot{Q}_1$, gdyż objętość w strefie „a” $V_2 > V_1$ ponieważ $l_2 > l_1$, a poza tym lepkość tworzywa w strefie „b” ślimaków $\eta_2 > \eta_1$, ponieważ jego temperatura $t_2 < t_1$).

— Na ślimaku S3 zostały umieszczone dwa segmenty ugniatające tzw. lewe (o lewym kierunku pochylenia pozornej linii śrubowej elementów krzywkowych) charakteryzujące się wstecznym kierunkiem transportowania, które powodowały w procesie wylączania wzrost wartości ΔMFR w porównaniu z ΔMFR ślimaka S1.

— Na ślimaku S4 umieszczono tylko jeden segment ugniatający tzw. lewy, który powodował porównywalną degradację tworzywa jak ślimak S3 z dwoma segmentami ugniatającymi.

Z porównania ślimaków S3 i S4 wynika, że korzystne jest rozdzielanie segmentów ugniatających seg-

mentem transportującym, jak ma to miejsce na ślimaku S3.

Zalecenia dotyczące konstrukcji dwuślimakowego układu uplastyczniającego

Zła przewodność cieplna PP nie pozwala na szybki wzrost jego temperatury, dlatego też aby tworzywo przeszło w stan płynny jest wymagany odpowiedni czas jego przebywania w kanałach ślimaków w strefie wstępnego podgrzewania. Zbyt krótki czas przebywania uniemożliwia osiągnięcie przez materiał temperatury mięknięcia, co stanowi przyczynę dużego spadku ciśnienia podczas przepływu tworzywa przez strefę uplastyczniania, a w konsekwencji w wyniku dużego rozproszenia energii mechanicznej napędu ślimaków wzrasta degradacja tworzywa w strefie uplastyczniania.

W procesie konstruowania współbieżnego dwuślimakowego układu uplastyczniającego do przetworzenia PP należy uwzględnić następujące wymagania:

— Uzyskanie wymaganej temperatury tworzywa przetwarzanego do strefy uplastyczniania w wyniku odpowiedniego wydłużenia strefy zasilania do (3—5)*D*.

— Zmniejszenie rozproszenia energii napędu w pierwszym odcinku strefy uplastyczniania w wyniku minimalizacji redukcji objętości kanałów wzdłuż długości tego odcinka strefy oraz zastosowania wspomagających transport segmentów ugniatających, ewentualnie o powiększonych luzach międzywojowych, zwłaszcza czołowych.

Struktura próbek PP z badań przemysłowych jako wskaźnik degradacji polimeru

Na podstawie termogramów DSC określono entalpię topnienia (ΔH) i wartości temperatury charakteryzujące proces topnienia. ΔMFR wyznaczono jako różnicę między wartościami *MFR* granulatu wytwarzanego w liniach L2 i L1. Wszystkie te dane zawiera tabela 3.

Zatem próbki z linii L1 wykazują w stosunku do próbek z linii L2 szerszy przedział temperaturowy ΔT . Sugeruje to szersze rozrzuty wymiarów i/lub stopnia doskonałości krystalitów. Określenie ewentualnych kierunków modyfikacji konfiguracji układu uplastyczniającego wyłącznie na podstawie termogramów DSC jest niemożliwe.

W analizie porównawczej widm FT-IR posłużono się widmami wzorcowymi PP [40]. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy widmami FT-IR próbek z linii L1 i L2, wykonano więc dodatkowe badania spektrofotometryczne próbek środków pomocniczych wprowadzanych do PP. Analizowano widma oscylacyjne FT-IR. Celem było tu ustalenie czy w próbkach PP otrzymanego w linii L2 o większej wartości ΔMFR może znajdować się większa ilość niewykorzystanej pozostałości środków pomocniczych. Zarejestrowano więc widmo FT-IR mieszaniny użytych środków pomocniczych (rys. 5).

T a b e l a 3. Parametry charakteryzujące proces topnienia i stopień degradacji w linii L2 w porównaniu z linią L1 (ΔMFR); dane dotyczą granulatu PP F-401

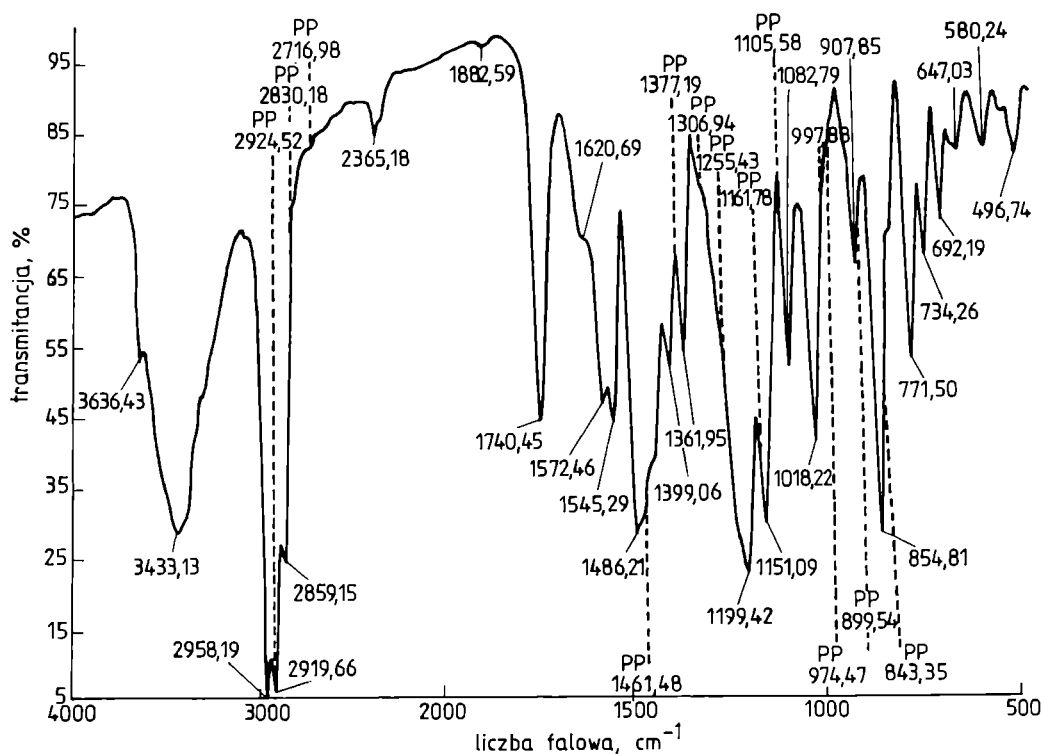
T a b l e 3. Parameters characterizing the melting process and degradation degree in L2 line in comparison with L1 line (ΔMFR). The data concern granulated PP F-401

Linia technologiczna	ΔH J/g	T_{m1} ^{*)} °C	T_{m2} ^{*)} °C	T_{max} ^{*)} °C	$\Delta T = T_{m2} - T_{m1}$ °C	ΔMFR g/10 min
L1	55,0	138,2	192,0	172,3	53,8	0,0
L2	58,0	138,8	183,4	171,6	44,6	0,53

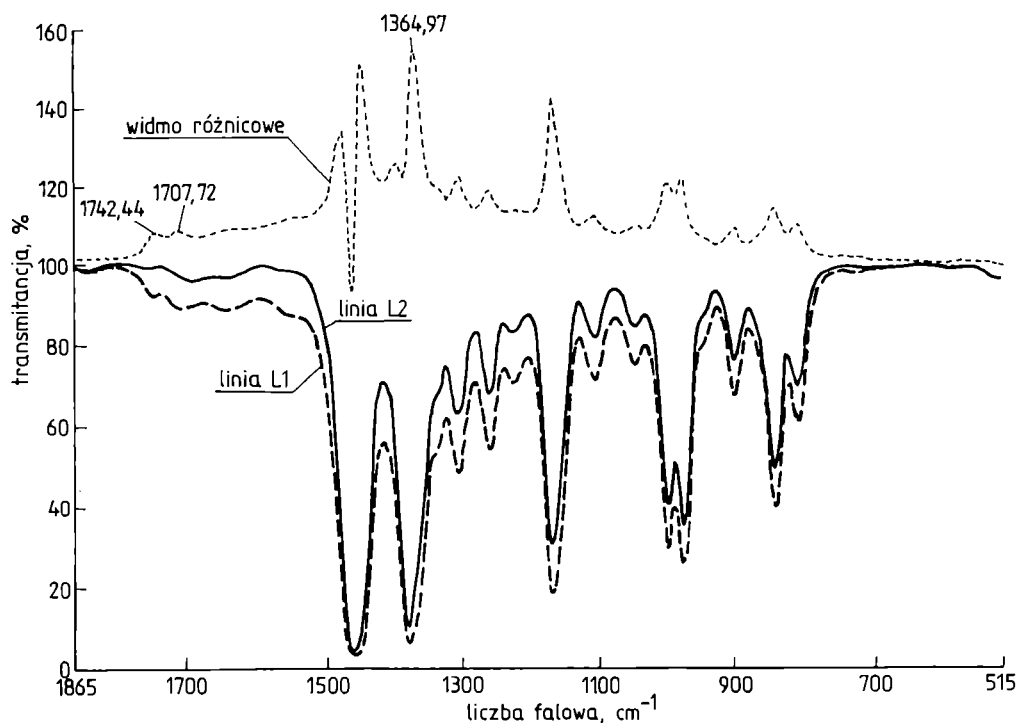
^{*)} T_{m1} — temperatura początku procesu topnienia, T_{m2} — temperatura końca procesu topnienia, T_{max} — temperatura odpowiadająca maksimum na krzywej DSC. L1 — dwustopniowa, L2 — jednostopniowa.

metryczne próbek środków pomocniczych wprowadzanych do PP. Analizowano widma oscylacyjne FT-IR. Celem było tu ustalenie czy w próbkach PP otrzymanego w linii L2 o większej wartości ΔMFR może znajdować się większa ilość niewykorzystanej pozostałości środków pomocniczych. Zarejestrowano więc widmo FT-IR mieszaniny użytych środków pomocniczych (rys. 5).

Porównanie widm próbek granulatu PP z linii L1 i L2 (rys. 6) wskazuje, że w tym drugim widmie są obecne dodatkowe pasma w zakresie ok. 1742 cm^{-1} (grupa karbonylowa) oraz 1365 cm^{-1} (OH w kwasach karboksylowych). Dodatkowe pasma — uwzględniając widmo mieszaniny środków pomocniczych (rys. 5) — sugerują obecność nieprzereagowanego środka pomocniczego



Rys. 5. Widmo FT-IR mieszaniny środków pomocniczych; PP — katalogowe położenia pasm polipropylenu
Fig. 5. FT-IR spectrum of a blend of the additives; PP — polypropylene bands catalogue positions



Rys. 6. Widmo FT-IR próbek granulatu z linii L1 i L2 oraz widmo różnicowe

Fig. 6. FT-IR spectrum of granulated products from L1 and L2 lines, and differential spectrum

w próbce z linii L2. Jest to prawdopodobnie wynikiem mniejszej efektywności mieszania układu uplastyczniającego w strefie wstępnego podgrzewania ślimaków wytłaczarki współbieżnej niż wytłaczarki przeciwbieżnej.

Modyfikacja konfiguracji układu uplastyczniającego wytłaczarki współbieżnej

Wyniki badań wytłaczania z granulowaniem PP F-401 z zastosowaniem układu uplastyczniającego standardowego (tj. układu współbieżnego bez modyfikacji) i zmodyfikowanego współbieżnego zawiera tabela 4. Zmodyfikowana konfiguracja układu uplastyczniającego wytłaczarki współbieżnej linii L2 umożliwia uzyskanie granulatu charakteryzującego się takim samym lub mniejszym stopniem degradacji jak w linii L1. Poza tym

linia L2 ze zmodyfikowaną konfiguracją układu uplastyczniającego pozwala na zmniejszenie zużycia energii układu napędu ślimaków (o ok. 18%). Zaobserwowany wzrost ciśnienia stopionego tworzywa na końcu ślimaków w przypadku układu zmodyfikowanego jest spowodowany większą lepkością stopionego materiału (mniejsza wartość ΔMFR , a więc mniejszy stopień degradacji w procesie uplastyczniania).

Wytłaczanie rur z napełnianego tworzywa

Właściwe zdyspergowanie napełniacza w tworzywie oceniano na podstawie chropowatości powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej wytłoczonej rury. Mniej chropowatą powierzchnią, zwłaszcza wewnętrzną, charakteryzowały się próbki rur otrzymane z układów uplastycz-

T a b e l a 4. Warunki wytłaczania z granulowaniem PP F-401 z zastosowaniem dwóch konfiguracji układów uplastyczniających — wytłaczarka ZE 130A

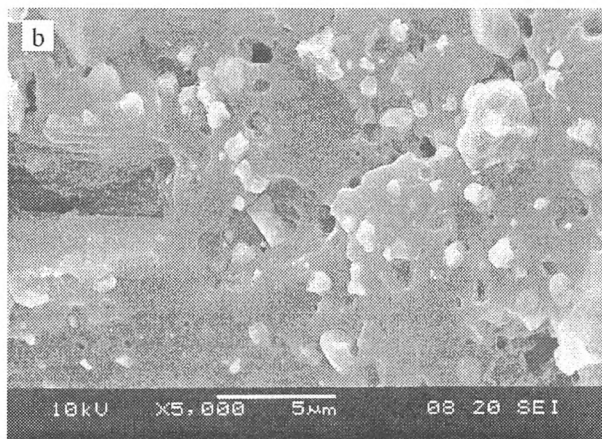
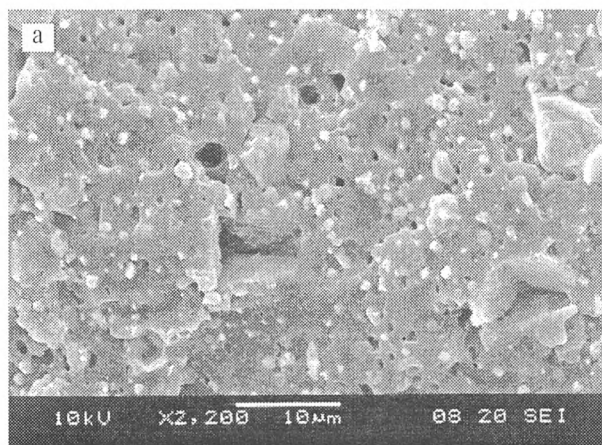
T a b l e 4. Conditions of extrusion with granulating of PP F-401 at various configuration plasticizing systems — extruder ZE 130A

Konfiguracja układu uplastyczniającego	Wydajność wytłaczania, kg/h	Szybkość obrotowa ślimaków, s ⁻¹	Ciśnienie stopionego tworzywa na końcu ślimaków, MPa	Jednostkowe zużycie energii układu napędu ślimaków, J/g	Stopień degradacji (ΔMFR) g/10 min	Uwagi
Standardowa	3000	5	11,5	780	0,7	MFR często przekracza górną wartość 3,2
Zmodyfikowana	3000—3200	4,3—4,5	14	600—650	-0,1	MFR w wymaganym przedziale wartości 2,4—3,2

niających o większej efektywności mieszania, tj. o wyższym stopniu wymieszania i rozdrobnienia napełniacza w tworzywie.

Jak już wcześniej wspomniano, na efektywność mieszania istotny wpływ wywiera konfiguracja stref ślimaków. Sposób wprowadzenia do PP kredy jako napełniacza powoduje znaczne różnice w wyglądzie wytłaczanych rur. Rury uzyskane w procesie wytłaczania z bocznym zasilaniem kredą z użyciem niedoskonałej konfiguracji ślimaków charakteryzowały się znaczną chropowatością powierzchni wewnętrznej, natomiast gdy kredę dozowano łącznie z PP miały powierzchnię bardziej gładką. Było to spowodowane mieszaniem składników na większej długości ślimaków.

Stwierdzono, że w razie niedoskonałej konfiguracji ślimaków może wystąpić znaczny rozrzut wartości MFR próbek pobranych z rur w różnym okresie czasu; świadczy to nie tylko o niestabilności procesu dozowania składników (niezależnie od miejsca dozowania), lecz również o niestabilności procesu uplastyczniania i mieszania w poszczególnych strefach ślimaków.



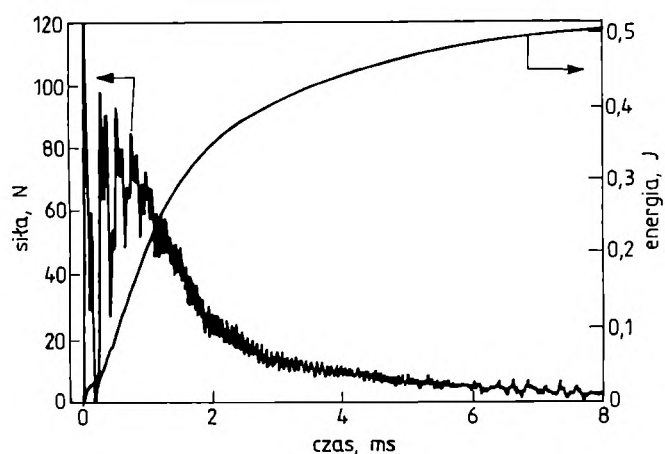
Rys. 7. Fotografie SEM przelomu próbki rury osłonowej wykonanej z PP napełnionego kredą w ilości 40% mas.; (a) powiększenie 2200, (b) powiększenie 5000

Fig. 7. SEM photographs of a fracture of lining pipe sample made of PP filled with 40 wt.% of chalk; (a) — magnification 2200, (b) magnification 5000

Z badań [41] wykonanych za pomocą mikroskopu elektronowego (rys. 7) widać, że ziarna kredy są rozmieszczone równomiernie w całej płaszczyźnie przelomu. Aglomeraty kredy występują bardzo rzadko i są utworzone z niewielkiej liczby ziaren. Wymiary ziaren kredy wynoszą z reguły 1—2 μm . Obserwacje te dotyczą wprowadzania kredy z boku z zastosowaniem udoskonalonej konfiguracji ślimaków.

Zaobserwowano ścisłą zależność właściwości mechanicznych rur od stopnia napełnienia PP oraz od rodzaju i ilości dozowanych środków pomocniczych. Ustalono, że ze wzrostem zawartości napełniacza maleje ich naprężenie zrywające oraz wydłużenie, natomiast wzrasta udarność z karbem i sztywność.

Na podstawie pomiarów udarności metodą Izoda [41] wyznaczono zależność siły i energii pęknięcia rury od czasu (rys. 8). Czas pęknięcia wynosi więc tu ok. 4 ms.



Rys. 8. Wpływ czasu do wystąpienia przelomu rury na wartości oddziaływującej siły i pobieranej energii (PP + 40% mas. kredy)

Fig. 8. Relation of time to the pipe fracture with the values of reacting force and energy input (PP + 40 wt.% of chalk)

Tabela 5 zawiera zestawienie niektórych właściwości wytłaczanych rur z PP napełnianych kredą.

Stwierdzono, że rury z PP napełnianego kredą w 30% mas. lub 40% mas. spełniają następujące wymagania określone w dotyczącej rur z PP nienapełnionego normie PN-EN1451-1:2001 „Systemy przewodowe z tworzyw sztucznych do odprowadzania nieczystości i ścieków (o niskiej i wysokiej temperaturze) wewnątrz konstrukcji budowli — Polipropylen”:

— odporność na uderzenia metodą spadającego ciężarka o masie 1 kg (PN-EN 744:1995): $h \geq 1,6$;

— odporność na cykliczne działanie podwyższonej temperatury (PN-EN 1055:1998): $T = (15 \pm 5)^\circ\text{C}$ i $T = (93 \pm 2)^\circ\text{C}$;

— skurcz wzdluzny w temp. 150°C (PN-EN 743:1999, metoda B): $< 2\%$;

Tabela 5. Wybrane właściwości rur ($\varnothing 110 \times 3,2$ mm) wytłoczonych metodą bezpośrednią z polipropylenu napełnianego kredą
 Table 5. Selected properties of the directly extruded pipes ($\varnothing 110 \times 3.2$ mm) made of PP filled with chalk

Właściwości	Metodyka badania	PP GFA 6100		PP BA202E	
		nienapełniony	30% mas. kredy	nienapełniony	40% mas. kredy
Gęstość, g/cm ³	hydrostatyczna	0,9	1,04	0,901	1,17
MFR _(230; 216)	PN-ISO 1133-1997	0,8	0,8	0,3	0,35
Granica plastyczności przy rozciąganiu, MPa	PN-EN ISO 527-2	24	18,9	28	18,8
Wydłużenie względne przy granicy plastyczności, %	PN-EN ISO 527-2	15	7,9	6	4,8

— wskaźnik szybkości płynięcia MFR_(230; 216) (PN-ISO 4440-1:1994 i PN-EN 4440-2:1994): <1,5 g/10 min.

Rury z PP napełnione kredą spełniają wymagania normy PN-EN1451-1:2001 dotyczące obszaru zastosowania o symbolu „B” (tj. wewnątrz budowli).

PODSUMOWANIE

Rozwiązania konstrukcyjne współbieżnych układów uplastyczniających, ze względu na występowanie w procesie przetwórstwa tworzywa znacznych naprężeń stycznych w przypadku nieodpowiedniej konfiguracji układu uplastyczniającego mogą powodować znaczną degradację PP o małym wskaźniku szybkości płynięcia (tj. <3,2 g/10 min). Przyczyną degradacji PP jest zbyt duże rozproszenie energii mechanicznej napędu ślimaków, przede wszystkim w strefie uplastyczniania tworzywa. Jest to spowodowane trudnościami w uzyskaniu w krótkim czasie odpowiedniej temperatury przez tworzywo, nawet w warunkach wysokiej temperatury stref grzejnych cylindra przed strefą intensywnego uplastyczniania. Układy uplastyczniające powodujące degradację polimeru charakteryzują się także zwiększonym zużyciem energii napędu ruchu ślimaków.

Zaletą bezpośredniego wytłaczania wytworów z tworzyw napełnianych (zamiast metody dwustopniowej, polegającej na wytwarzaniu granulatu i następnym wytłaczaniu rury) jest obniżenie kosztów ich wytwarzania wynikające z ograniczenia zużycia energii oraz wzrost jakości wytworu w rezultacie zmniejszenia obciążenia cieplnego tworzywa. Poza tym istnieje możliwość szybkiej zmiany właściwości wytworu na drodze zmiany ilości i rodzaju dozowanych składników. Zastosowanie w procesie bezpośredniego wytłaczania rur składnika mineralnego jako napełniacza ma aspekt nie tylko ekonomiczny, ale proekologiczny, gdyż użycie istotnych ilości składnika mineralnego umożliwia zaoszczędzenie deficytowych zasobów naturalnych (głównie ropy naftowej).

Praca częściowo finansowana z grantu KBN nr 7 T08E 032 21.

LITERATURA

1. Stasiek J.: *Polimery* 2002, 47, 441.

- Sikora R.: „Leksykon Naukowo-Techniczny”, Vadim Plast Sp.J., Warszawa 2002.
- Potent H., Bastian M., Flecke J.: *Adv. Polym. Technol.* 1999, 18, 147.
- White J. L., Bawiskar S., Kim E. K., Kim B. J.: *KU Kunststoffe* 1999, 89, nr 8, 76.
- Avalosse T., Rubin Y.: *Int. Polym. Process.* 2000, 15, 117.
- Sikora R.: *Folia Societatis Scientiarum Lublinensis* 1994, 3, tech. nr 1, 19.
- Golębiewski J., Stasiek J.: *Przem. Chem.* (w druku).
- Schüler W.: *Kunststoffe* 1997, 87, 1520.
- Ernst D.: *Kunststoffberater* 1995, 4, 38.
- Berghaus U., Müller H.: *Kunststoffe* 1995, 85, 1294.
- Kühlborn D.: *Plast. Spec.* 1999, nr 9, 21.
- Kapfer K.: *Plastverarbeiter* 2000, 51, nr 9, 64.
- Stasiek J.: Konferencja „Advances in Plastics Technology — APT' 01”, Katowice, 18—20 września 2001 r., Materiały, referat nr 17.
- Stasiek J.: *Polimery* 1997, 42, 14.
- Szulik-Kojemska Z., Batorska S.: *Przem. Chem.* 2002, 81, 624.
- Potent H., Flecke J., Blach M., Vorberg F.: *Kunststoffe* 1998, 88, 494.
- Valsamis L. N.: *Mod. Plast. Int.* 1996, nr 10, 115.
- Pat. europejski* 0 624 124, B1 (1993).
- Europejskie zgłosz. pat.* 0 522 390 A1 (1992).
- Pat. polski* 177 289 (1995).
- Publikacja* WO 98/15400 (1997).
- Pongratz S., Durian-Montagne F.: *Kunststoffe* 2000, 90, 52.
- Sikora R.: „Tworzywa wielkocząsteczkowe, rodzaje, właściwości i struktura”, Wydawnictwo Uczelniane, Lublin 1991, str. 367—369.
- Krüger P., Zobel M.: „Optimierung des Compoundierprozesses durch Rezeptur — und Verfahrensverständnis”, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1997, Materiały, str. 5—37.
- Hensen F., Knappe W., Potente H.: „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik, I Grundlagen, Extrusionsanlagen”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1989, str. 8—12 i 289—349.
- White J. L.: „Twin Screw Extrusion”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork 1990, str. 195—270.
- Praca zbiorowa: „Mixing in polymer processing” (red. Rauwendal J. C.), Marcel Dekker Inc. 1991, str. 241—323.
- „Der Doppelschneckenextruder im Extrusionsprozess”, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1991, str. 9—71.
- Jurkowski B., Jurkowska B.: „Sporządzanie kompozycji polimerowych”, WNT, Warszawa 1995.
- Przygoda M., Pawlak A., Gałęski A.: *Polimery*, 1995, 40, 289.
- Liebold J.: *Plastverarbeiter* 1996, 47, nr 7, 26.
- Koszkul J.: „Polipropylen i jego kompozyty”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.
- Polskie zgłosz. pat.* 340 796 (1999).
- Wild. W., Schönfeld S.: *Plast. Spec.* 2000, nr 6, 54.
- Materiały informacyjne firm Leistritz (Nürnberg-Niemcy) i Berstorff (Hannover, Niemcy).
- Stasiek J.: 4th International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel/Niemcy 2002, Materiały, str. od 30-1 do 30-8.
- Polskie zgłosz. pat.* 345 869 (2001).
- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Uczelniane, Lublin 1992, str. 366—368.
- Todd D. B.: *Int. Polym. Process.* 1993, 8, 113.
- Mece R.: „Infrared Spectra of Selected Chemical Compounds”, Londyn 1965.
- Morawiec J.: „Badanie rur z PP napełnionej kredą”. Sprawozdanie z prac Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN, Łódź 2001 (praca niepublikowana).