

P O L I M E R Y

MIESIĘCZNIK POŚWIĘCONY CHEMII, TECHNOLOGII i PRZETWÓRSTWU POLIMERÓW

JOACHIM STASIEK

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

Współczesne technologie i urządzenia do wytłaczania folii metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniami

Cz. I. WYTŁACZANIE Z ROZDMUCHIWANIEM FOLII Z TWORZYW POLIMEROWYCH

MODERN TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR BLOWING EXTRUSION OF THE FILMS. PART I. BLOWING EXTRUSION OF THE FILMS FROM PLASTICS

Summary — General characteristics and properties of the plastics used for manufacturing of the films as well as characteristics of the films produced (Table 1) were presented in this review. Basic good points of treelayer PE films in comparison with monolayer film properties were pointed out. Processes of mono- and multilayer films extrusion by either one-stage blowing process (Fig. 1) or two-stage one (Fig. 2) were discussed. The problems concerning film orientation in the extrusion process were additionally presented. Process of orientation leads indeed to the films showing advantageous useful properties but versatility of the equipment use is limited.

Key words: plastics, blowing extrusion, one-stage or two-stage processes, film, molecular orientation.

Folie z tworzyw polimerowych [1—8] mają różnorodne zastosowania. Największą ich ilość zużywa przemysł opakowaniowy do jednostkowego pakowania produktów, ale są one użytkowane również w budownictwie, elektrotechnice i innych dziedzinach gospodarki. Folie takie najczęściej wytwarza się metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniami, natomiast w mniejszym zakresie — przy użyciu dyszy szczelinowej płaskiej; są one nazywane wówczas foliami płaskimi [9, 10]. Folie płaskie grubości 0,008—0,3 mm ochładza się na drodze wylewania na walec chłodzony wodą (*cast* lub *chill roll*), a folie

grubsze (grubości 0,025—1,5 mm) są ochładzane na walcach gładziarki (na ogół trójwalcowej).

Należy zaznaczyć, że od wielu lat obserwuje się dynamiczny wzrost zastosowań w technice opakowaniowej orientowanej folii polipropylenowej (OPP) wytwarzanej za pomocą dyszy szczelinowej płaskiej, a obecnie również tzw. folii wylewanej. Stały wzrost zastosowania folii OPP wynika z jej specyficznych właściwości, takich jak ochronne utrzymywanie jakości różnorodnych produktów, zwłaszcza spożywczych, oraz, przede wszystkim, możliwości użycia ich w różnych systemach pakowania.

Metoda wytłaczania z rozdmuchiwaniami folii [1, 2, 7, 9—12] ma dominujące znaczenie, ponieważ:

— umożliwia wytłaczanie bardzo szerokich folii rurowych (rurę nazywa się także rękawem folii);

— pozwala na przetwarzanie tworzyw polimerowych o bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym, np. polietylenu typu PE-UHMW, dzięki czemu uzyskuje się folie charakteryzujące się korzystnymi właściwościami mechanicznymi [13];

— na właściwości folii można wpływać poddając tworzywo orientacji molekularnej, która występuje w procesie wytłaczania z dwustopniowym rozdmuchiwaniami folii (*double-bubble line*) [1, 12, 13];

— można bez dodatkowych nakładów finansowych różnicować wymiary folii, co powoduje, że metoda ta staje się bardzo opłacalna.

Procesy technologiczne wytłaczania folii, zwłaszcza folii opakowaniowych, uległy w ostatnich latach znacznej intensyfikacji [1, 2, 7, 9—18], głównie dzięki zastosowaniu automatyzacji i znacznemu zwiększeniu wydajności wytłaczania [1—7].

W niniejszej pierwszej części opracowania omówiono podstawowe tworzywa polimerowe stosowane do wytwarzania folii oraz przedstawiono przegląd technik wytwarzania folii metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniami.

TWORZYWA DO WYTWARZANIA FOLII

Podstawowymi tworzywami polimerowymi stosowanymi w produkcji folii [1—8] są najczęściej poliolefiny, głównie polietylen małej gęstości (PE-LD), polietylen liniowy małej gęstości (PE-LLD) i polietylen dużej gęstości (PE-HD), ale często wykorzystuje się również polistyren (PS), polipropylen (PP), poli(chlorek winylu) (PVC), poli(tereftalan etylenu) (PET). Poza tym stosowane są inne tworzywa polimerowe, m.in. poliamid (PA), kopolimer etylen/octan winylu (EVAC), kopolimer etylen/alkohol winylowy (EVOH), poli(alkohol winylowy) (PVOH) i poli(chlorek winylidenu) (PVDC).

Z polietylenu wytwarza się głównie folie termokurczliwe, rozciągliwe oraz folie do produkcji worków transportowych. Z publikacji [4, 5, 8] wynika, że światowe zużycie polietylenu do wytwarzania folii w 2000 r. wyniosło ok. 25 milionów ton, co stanowi w przybliżeniu 50 % światowej produkcji tego polimeru.

Otrzymywany od blisko 15 lat pod wpływem katalizatorów metallocenowych polietylen [4, 8, 19, 20], to przede wszystkim metallocenowy polietylen liniowy małej gęstości (*m*PE-LLD). Jest on stosowany do wytwarzania folii o bardzo dobrych właściwościach mechanicznych i optycznych. Bardziej regularna budowa cząsteczkowa tych polimerów (węższy rozkład zarówno ciężaru cząsteczkowego, jak i jednostek komonomerycznych w łańcuchu polimeru) jest przyczyną większej ich lepkości w porównaniu z lepkością polimerów otrzymywanych metodą konwencjonalną. Ze względu na tę

większą lepkość polimerów metallocenowych należy użyć wyższego ciśnienia niezbędnego do wytłaczania folii, co wymaga także zwiększenia momentu obrotowego napędu ślimaków wytłaczarek. Poza tym konieczne są modyfikacje konstrukcji kanałów przepływowych głowicy w celu umożliwienia prowadzenia procesu wytłaczania z taką samą wydajnością, jak w przypadku polimerów konwencjonalnych. Korzystny dobór elementów geometrycznych zarówno układu uplastyczniającego wytłaczarki, jak i głowicy, pozwala na wytłaczanie tych polimerów w dotychczas produkowanych liniach technologicznych.

Istnieją możliwości pewnego regulowania właściwości folii na drodze łączenia różnych tworzyw metodą współwytłaczania, w wyniku czego uzyskuje się folie wielowarstwowe [1—7, 14—18]. Folie takie stanowią grupę materiałów charakteryzujących się stałym wzrostem zużycia i znaczenia.

Metoda współwytłaczania folii pozwala na:

— polepszenie właściwości przetwórczych folii, np. zgrzewalności;

— ułatwienie pracy maszyn pakujących, m.in. ze względu na zwiększenie sztywności folii;

— obniżenie kosztów, m.in. dzięki zmniejszeniu całkowitej grubości folii bez zmiany właściwości mechanicznych;

— polepszenie właściwości użytkowych, np. zwiększenie współczynnika tarcia, przejrzystości, odporności cieplnej, a zwłaszcza barierowości folii.

Poszczególne warstwy tworzyw w folii wielowarstwowej spełniają określone funkcje, głównie przenoszą obciążenia zewnętrzne (tworzywa nośne), stanowią barierę w odniesieniu do tlenu lub pary wodnej (tworzywa barierowe) lub łączą współwytłaczane tworzywa (tworzywo wiążące).

W zależności od spełnianej funkcji, stosuje się zwykle następujące rodzaje tworzyw:

— tworzywa nośne: PE-LD, PE-HD i PP;

— tworzywa nośne jednocześnie o dobrych właściwościach zgrzewalnych: PE-LLD, polietylen bardzo małej gęstości (PE-VLD), EVAC, tworzywa jonomerowe;

— tworzywa barierowe: PA6, PVDC, kopolimery poliamidowe, EVOH;

— tworzywa wiążące: na podstawie PE-LLD, PE-HD i EVAC.

Obecnie szerokie zastosowanie, oprócz folii barierowych w stosunku do tlenu, znalazły folie trójwarstwowe wytwarzane tylko z poliolefin [1—7, 21], w tym folie ze środkową warstwą z poliolefin napełnionych składnikami mineralnymi, których zawartość osiąga nawet 55 % ogólnej masy tworzywa [22].

Folie trójwarstwowe w porównaniu z poliolefinowymi foliami jednowarstwowymi charakteryzują się podstawowymi zaletami [4, 5, 12, 21] zarówno ekonomicznymi, jak i technicznymi.

Zalety ekonomiczne wynikają z korzystniejszych właściwości wytrzymałościowych folii. Na przykład fo-

lia trójwarstwowa PE-LD/PE-LLD/PE-LD ma wytrzymałość na rozrywanie i obciążenia uderzeniowe większe o ok. 30 % niż folia jednowarstwowa z PE-LD takiej samej grubości, stąd istnieje możliwość zmniejszenia grubości produkowanej folii, a w efekcie obniżenie kosztów materiałowych. Korzystne właściwości mechaniczne uzyskuje się również w przypadku folii trójwarstwowej PE-LD/PE-HD/PE-LD, w której dodatki (substancje poślizgowe, antystatki) są wprowadzane tylko do warstw zewnętrznych, co także wpływa na ograniczenie kosztów.

Zalety techniczne polegają na polepszeniu zgrzewalności folii dzięki zastosowaniu PE-LLD i/lub zwiększeniu sztywności folii w wyniku zastosowania PE-HD bądź PP. Inne tego rodzaju zalety to możliwość wytłaczania folii wielobarwnych i wykonania warstwy środkowej z recyklatu.

Obecnie technologia współwytłaczania pozwala na dobór tworzyw prowadzący do uzyskania materiału o zaplanowanych właściwościach. Dlatego też coraz częściej folie jednowarstwowe są zastępowane foliami wielowarstwowymi. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań dotyczących właściwości wybranych folii jednowarstwowych otrzymanych m.in. z PE-LLD oraz folii trójwarstwowych, w tym także folii orientowanych wytworzonych w liniach technologicznych wytłaczania z rozdmuchiwaniami dwustopniowym (por. dalszy tekst). Dane w tabeli wskazują, że w celu uzyskania du-

żej wytrzymałości na rozciąganie folii trójwarstwowych należy zastosować PE-HD w warstwie środkowej („Tipelin”), natomiast aby otrzymać folie o dużej wytrzymałości na uderzenie należy użyć *m*PE-LLD. Zwiększenie sztywności folii jednowarstwowej zapewnia stosowanie jako napełniaczy składników mineralnych, np. kredy i talku. Orientowane folie zarówno z poliolefin, jak i PVC w porównaniu z foliami nieorientowanymi charakteryzują się większą wytrzymałością mechaniczną i przezroczystością.

WYTŁACZANIE Z ROZDMUCHIWANIEM FOLII

Kształtowanie struktury nadcząsteczkowej polimeru

Orientowanie jest to proces tworzenia uporządkowanej struktury makrocząsteczek w wyniku rozciągania tworzywa polimerowego. Można prowadzić go po podgrzaniu tworzywa powyżej temperatury zeszklenia, kiedy to następuje wymuszone mechanicznie, równoległe ułożenie wyprostowanych makrocząsteczek wzdłuż osi działania siły rozciągającej.

Uzyskana w procesie orientowania folii z krystalicznych tworzyw polimerowych w miarę jednorodna struktura nadcząsteczkowa różni się od struktury utworzonej przez krystalizację w toku krystalizacji cieplnej. W procesie rozdmuchiwania folii z polimerów krystalicznych w temperaturze tworzywa polimerowego niż-

T a b e l a 1. Właściwości wybranych rodzajów folii otrzymanych metodą wytłaczania z jednostopniowym (J) i dwustopniowym (D) rozdmuchiwaniami

T a b l e 1. Properties of selected films obtained by extrusion with one-stage (J) or two-stage (D) blow molding

Właściwości	Norma	Folie trójwarstwowe		Folie jednowarstwowe			
		„Dowlex” / „Tipelin” / „Dowlex” ^{a)} (J)	„Dowlex” / „Exceed” / „Dowlex” (J)	PVOH (J) [23]	PO napełnione składnikami mineralnymi (J)	PO (D)	PVC (D)
Grubość, mm		0,023	0,040	0,047	0,065	0,015	0,025
Naprężenie zrywające:	PN-EN ISO 527-1, -3						
— wzdłuż, MPa		39	33	62	29	96	72
— w poprzek, MPa		38	30	41	25	94	63
Wydłużenie względne:	PN-EN ISO 527-1, -3						
— wzdłuż, %		762	609	184	751	122	168
— w poprzek, %		904	623	284	876	147	179
Opór przedarcia wg Elmendorfa:	PN-ISO 6383-2						
— wzdłuż, N		2,81	2,68	0,19	2,52	0,05	0,10
— w poprzek, N		9,17	4,52	0,18	10,63	0,07	0,17
Wytrzymałość na uderzenie spadającego grotu, N	PN-ISO 7765-1	1,80	4,32	—	1,81	4,00	—
Kurczliwość folii:	PN-75/C-89097						
— wzdłuż, %		—	—	—	—	73,9	41,9
— w poprzek, %		—	—	—	—	65,9	37,6

^{a)} „Dowlex NG 5056.01” firmy Dow — kopolimer etylen/okt-1-en, $MFR_{(190/2,16)} = 1,1$, naprężenie zrywające (folia grubości 0,025 mm) = 19/28 MPa; „Exceed 1018 EB” firmy Exxon Chemical — *m*PE-LLD, $MFR_{(190/21,6)} = 1$, naprężenie zrywające (folia grubości 0,025 mm) = 74/64 MPa; „Tipelin FS 340-03” firmy TVK — PE-HD, $MFR_{(190/21,6)} = 14$, naprężenie zrywające = 40/35 MPa.

szej od jego temperatury topnienia ma miejsce rozciąganie wzdłuż prostopadłych do siebie osi: w kierunku wzdłużnym folia jest rozciągana pod wpływem różnic prędkości wałków zamykających i odbierających, natomiast w kierunku poprzecznym (obwodowym) rozciąganie dokonuje się za pomocą sprężonego powietrza. Utworzone w procesie orientacji tworzywa krystality są tak małe, że nie powodują załamania światła i tym samym otrzymuje się folię prawie całkowicie przezroczystą. Krystalizacja utrwała rozciągniętą strukturę tworzywa, nie pogarszając właściwości optycznych, gdyż rodzaj krystalitów nie ulega większym zmianom.

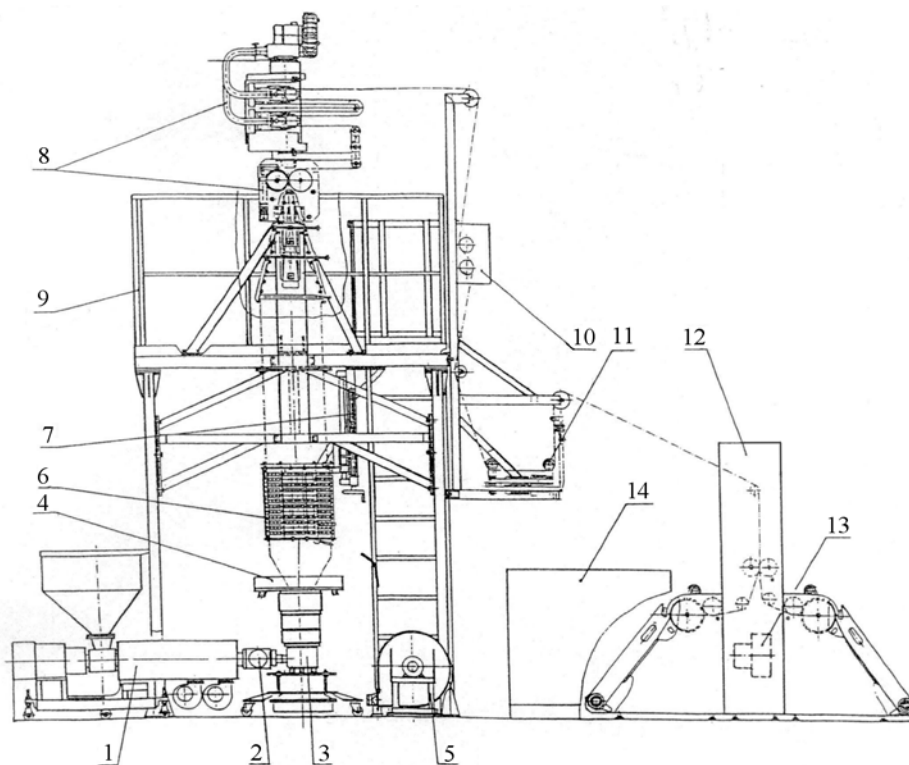
Wytlaczanie z rozdmuchiwanym jednostopniowym

W technologii wytłaczania z rozdmuchiwanym folii wyróżnia się dwa podstawowe procesy, mianowicie wytłaczanie tworzywa oraz rozdmuchiwanie folii. W pierwszym z nich w zależności od rodzaju wytłaczanej folii,

tj. jednowarstwowej lub wielowarstwowej, stosuje się odpowiednio jedną lub kilka wytłaczarek. Na proces rozdmuchiwania folii składa się formowanie rury cienkościennej i jej rozdmuchiwanie.

W technologii wytłaczania z rozdmuchiwanym jednostopniowym (rys. 1) wyróżnia się następujące etapy: dozowanie tworzywa (lub tworzyw) oraz składników dodatkowych, uplastycznianie w wytłaczarce (lub w wytłaczarkach), kształtowanie strumienia w głowicy do postaci rury cienkościennej, ochładzanie i jednoczesne formowanie folii na drodze jej wyciągania i rozdmuchiwania do wymaganych wymiarów, spłaszczanie folii do postaci podwójnie złożonej wstęgi, odbieranie spłaszczonej folii oraz jej zwijanie.

W tradycyjnej technologii wytłaczania z rozdmuchiwanym jednostopniowym folii (nazywanego często skrótowo procesem wytłaczania z rozdmuchiwanym folii) uformowana w dyszy głowicy rura cienkościenna jest poddawana jednocześnie chłodzeniu i dwuosiowej



Rys. 1. Linia do wytłaczania z rozdmuchiwanym jednostopniowym (konstrukcji IPTS Metalchem Toruń) folii trójwarstwowej PE-LD/środek wiążący/PA6 (szerokość spłaszczonego rękawa 150–400 mm): 1 — układ trzech wytłaczarek do wytłaczania PE-LD, PA6 i środka wiążącego, 2 — filtr tworzywa, 3 — głowica, 4 — pierścień chłodzący, 5 — wentylator chłodzący, 6 — kosz stabilizujący (kalibrujący), 7 — mechanizm śrubowy z napędem do podnoszenia kosza, 8 — urządzenie odbierające obrotowo-nawrotne, 9 — konstrukcja nośna, 10 — aktywator z wyciągiem ozonu, 11 — układ prowadzenia spłaszczonej folii rurowej (rękawa), 12 — urządzenie nawijające, 13 — zespół odbioru obciętej krawędzi folii, 14 — szafa sterownicza

Fig. 1. Line for one-stage blowing extrusion (designed in IPTS Metalchem, Toruń) of treelayer PE-LD/bonding agent/PA6 film (the width of flat sleeve 150–400 mm): 1 — set of 3 extruders for PE-LD, PA 6 and bonding agent, 2 — plastic melt filter, 3 — die head, 4 — cooling ring, 5 — cooling fan, 6 — stabilizing (calibrating) basket, 7 — screw elevator for a basket, 8 — rotary-reversible collection unit, 9 — supporting structure, 10 — activator with ozone ventilating hood, 11 — guide for flat sleeve film, 12 — wind-up reel, 13 — film cut edge collecting unit, 14 — power control device

orientacji. Orientacja strumieniowa jednostek strukturalnych występująca podczas swobodnego wyciągania uplastycznionego tworzywa z dyszy pierścieniowej głowicy zależy od iloczynu podłużnego gradientu prędkości i czasu relaksacji, który to iloczyn jest proporcjonalny do lepkości tworzywa i uwarunkowany przebiegiem zestalania [24]. Trwałe stany orientacji powstają tylko wówczas, gdy następuje szybkie zestalanie tworzywa, tzn. w wyniku odpowiedniego przedłużenia czasu relaksacji tworzywa.

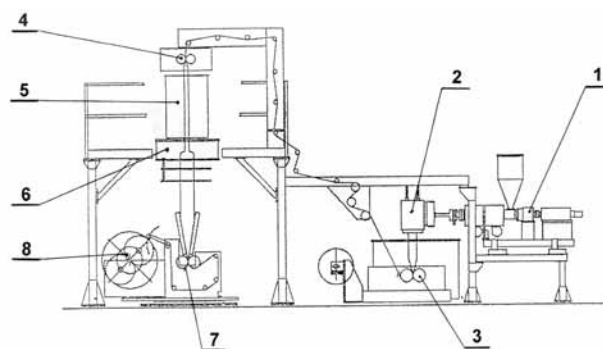
Podczas jednostopniowego rozdmuchiwania rury cienkościennej tworzywo jest wprowadzane orientowane dwuosowo, jednak procesowi rozciągania ulega tutaj tylko opuszczające dyszę głowicy tworzywo, które znajduje się w stanie plastycznym lub ciekłym, gdyż temperatura wytłaczanego tworzywa znacznie przekracza jego temperaturę topnienia. Aczkolwiek występuje tu orientacja molekularna, co potwierdzają zwiększone wartości właściwości mechanicznych folii, jednak zmiany te są nieduże w porównaniu z kilkukrotnym zwiększeniem tych właściwości w przypadku folii uzyskanych w procesie wytłaczania z dwustopniowym rozdmuchiowaniem (por. tabela 1). Dlatego też folie z PE wytwarzane metodą wytłaczania z jednostopniowym rozdmuchiowaniem nie są uważane za orientowane.

Wytłaczanie z rozdmuchiowaniem dwustopniowym

Folie otrzymywane metodą wytłaczania z rozdmuchiowaniem dwustopniowym zalicza się do folii orientowanych, gdyż podczas drugiego stopnia rozdmuchiwania folii jej rozciąganie, a tym samym orientacja, przebiega w temperaturze niższej od temperatury topnienia tworzywa polimerowego, co zapewnia m.in. znaczne polepszenie właściwości mechanicznych w porównaniu z metodą jednostopniową. Ponadto folie wytwarzane metodą wytłaczania z rozdmuchiowaniem jednostopniowym charakteryzują się ograniczoną przezroczystością i mało estetycznymi połączeniami zgrzewanymi; zmniejsza to atrakcyjność zapakowanego produktu i dlatego też folii tych nie stosuje się do owijania drożdżowych wyrobów. W tym celu używane są folie orientowane uzyskiwane metodą wytłaczania z rozdmuchiowaniem dwustopniowym charakteryzujące się znaczną wytrzymałością mechaniczną i przezroczystością, mianowicie folie z PVC lub z poliolefin (PE lub PE i PP) grubości 12–30 μm [25]. W tym procesie technologicznym wytwarza się również folie jednowarstwowe i wielowarstwowe z użyciem PA, EVOH, PVDC, EVAC i tworzyw jonimerowych o dobrych właściwościach mechanicznych oraz barierowych [15, 26–30]. Folie orientowane (tabela 1) wykorzystuje się głównie jako folie termokurczliwe do pakowania produktów spożywczych wysokiej jakości, natomiast rękawy folii stosuje się jako osłonki przetworów mięsnych lub wykonuje się z nich torebki do przechowywania żywności w atmosferze obojętnej.

Wytłaczanie folii orientowanych

Proces wytłaczania folii orientowanych odbywa się w liniach technologicznych działających w sposób ciągły, których rozwiązanie konstrukcyjne jest podobne do rozwiązania konstrukcyjnego linii do wytłaczania z rozdmuchiowaniem jednostopniowym folii z tym, że stosuje się tutaj drugi stopień rozdmuchiwania folii.



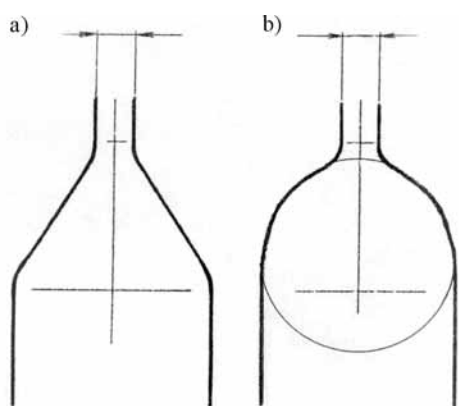
Rys. 2. Linia „Tube 2000” Model S do wytłaczania z rozdmuchiowaniem dwustopniowym folii orientowanej (rozwiązanie firmy Polytech S.P.A., Marano Ticino, Włochy): 1 — wytłaczarka, 2 — głowica, 3 — urządzenie odbierające ochłodzoną folię, 4 — urządzenie z układem wałków zamykających, 5 — nagrzewnica wstępna, 6 — nagrzewnica folii orientowanej, 7 — urządzenie odbierające folię orientowaną, 8 — urządzenie nawijające [27, 28]

Fig. 2. Line Tube 2000 Model S for two-stage blowing extrusion of oriented film (solution of Polytech S.P.A., Marano Ticino, Italy): 1 — extruder, 2 — die head, 3 — cooled film collection unit, 4 — system of rollers, 5 — preliminary heater, 6 — oriented film heater, 7 — oriented film collection unit, 8 — wind-up reel [27, 28]

Linia technologiczna przedstawiona na rys. 2 służy właśnie do wytłaczania z dwustopniowym rozdmuchiowaniem folii orientowanych z PA, EVOH, PE-LD, PE-LLD, EVAC lub z tworzywa jonimerowego wraz ze środkami wiążącymi. Pozwala ona na otrzymywanie folii złożonej z 3, 5 lub 7 warstw grubości 25–90 μm i szerokości złożonego rękawa od 50 do 600 mm. Na pierwszym stopniu procesu czynne elementy to wodny intensywny układ chłodzący oraz urządzenie odbierające folię. Drugi stopień rozdmuchiwania folii obejmuje urządzenie zamykające rękaw folii, zespół nagrzewnic z promiennikami podczerwieni oraz obrotowo-nawrotne urządzenie odbierające folię orientowaną. Folia przechodząc przez zespół nagrzewnic ulega nagrzanemu i jednoczesnemu rozciąganiu poprzecznemu oraz wzdłużnemu, co powoduje orientację tworzywa polimerowego.

Cechą charakterystyczną omawianego procesu technologicznego jest fakt, że współczynnik rozdmuchania folii uzyskiwany na pierwszym stopniu jej rozdmuchiwania jest równy jedności lub niewiele przekracza 1 (np.

w odniesieniu do folii ze zmiękzonego PVC współczynnik rozdmuchania jest zbliżony do 1,3). Następnie folia jest poddawana intensywnemu chłodzeniu (zwykle powietrzem, a w przypadku poliolefin — wodą). Na drugim stopniu rozdmuchiwania folię ponownie nagrzewa się do temperatury niższej od temperatury topnienia tworzywa, ale wyższej od jego temperatury zeszklenia, a następnie znów rozciąga w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. Średnicę i kształt rozdmuchiwanej folii rurowej (rękawa), tj. przebieg zmian średnicy wzdłuż osi (rys. 3), można regulować dobierając odpowiednią wartość ciśnienia powietrza rozdmuchującego i temperatury poszczególnych stref nagrzewania folii.



Rys. 3. Modelowy zarys wzdłużny rozdmuchiwanej folii z poliolefin podczas drugiego stopnia rozdmuchiwania: a) niekorzystny, b) korzystny

Fig. 3. Model longitudinal profile of polyolefin blowing process film during the second stage of blowing process: a) disadvantageous, b) advantageous

Zwiększenie wytrzymałości tworzywa w wyniku orientacji molekularnej ogranicza wartość średnicy rozdmuchiwanej folii rurowej (rękawa). Badania wskazują, że korzystną wytrzymałość i kurczliwość folii uzyskuje się w przypadku półkulistego zarysu wzdłużnego jej rozdmuchiwania (rys. 3b), tj. podczas przemieszczania folii przez nagrzewnicę końcową (rys. 2, poz. 6). Całkowity stopień rozciągnięcia folii (czyli iloczyn stopnia rozciągnięcia poprzecznego i stopnia rozciągnięcia wzdłużnego) w przypadku wytłaczania folii ze zmiękzonego PVC jest mały — mieści się na ogół w przedziale od ok. 3 do 5 — natomiast podczas współwytłaczania, tj. podczas wytłaczania tzw. folii poliolefinowych (głównie PE-LD i PE-LLD), wynosi przeciętnie 30 a nawet więcej.

Rozciąganie folii rurowej wywołuje orientację makrocząsteczek tworzywa, a w efekcie — polepszenie właściwości mechanicznych i optycznych; mimo to folia w ciągu jej użytkowania pod wpływem temperatury ulega nadmiernemu kurczeniu, co powoduje zmiany grubości. Dlatego często orientowaną folię z polimerowych tworzyw krystalicznych poddaje się dodatkowo

procesowi stabilizacji cieplnej w temperaturze, w której zachodzi proces krystalizacji [28, 30, 31]. Podczas stabilizacji cieplnej następuje bowiem redukcja naprężeń wewnętrznych powstałych w toku procesu orientowania. Stabilizację stosuje się m.in. w procesie wytwarzania osłonek z PA przeznaczonych do pakowania przetworów mięsnych, natomiast folie, które mają pełnić rolę termokurczliwych nie są poddawane procesowi stabilizacji cieplnej.

Folia orientowana otrzymywana w procesie wytłaczania z rozdmuchiowaniem dwustopniowym jest często również poddawana modyfikacji radiacyjnej (działaniu promieniowania elektronowego). Celem takiej modyfikacji jest sieciowanie polimeru powodujące korzystne zmiany właściwości mechanicznych, cieplnych i chemicznych folii [2, 27, 30, 32, 33]. Jeżeli nie jest wymagany wysoki stopień skurczu folii (np. do ok. 30 %) tylko zwiększona wytrzymałość na rozrywanie i przebicie stosunkowo cienkiej folii, to proces napromieniania jest realizowany po procesie orientowania folii. Natomiast, jeżeli jest on wymagany (>50 %), to proces napromieniania folii odbywa się przed jej orientowaniem.

Analiza procesów wytłaczania z rozdmuchiowaniem dwustopniowym folii wskazuje, że istotny wpływ na uzyskanie korzystnych właściwości folii orientowanych mają następujące czynniki:

— Realizacja procesu rozciągania w niskiej temperaturze, powodująca większą orientację molekularną. Dlatego np. proces rozciągania folii z PA6 prowadzi się na ogół po szybkim ochłodzeniu w wodzie — uzyskując w temp. 60—80 °C fazę amorficzną jako dominującą. W przypadku niewielkiego całkowitego stopnia rozciągnięcia folii wynoszącego ok. 3 i realizacji procesu stabilizacji cieplnej folii w temp. ok. 170 °C znacznie (co najmniej dwukrotnie) zwiększa się wytrzymałość na rozciąganie.

— Prędkość rozciągania folii — czym jest ona większa, tym większa orientacja, gdyż odkształcenia sprężyste przebiegają szybciej niż odkształcenia plastyczne (lepkościowe).

— Stopień rozciągnięcia — wyższy stopień powoduje na ogół, w warunkach stałej temperatury i prędkości rozciągania, większą orientację molekularną tworzywa.

— Szybkość ochładzania folii — duża szybkość umożliwia utrwalenie wyższego stopnia orientacji molekularnej tworzywa.

Cecha charakterystyczna linii technologicznych do wytłaczania z rozdmuchiowaniem folii orientowanych, czyli układ rozdmuchiowania dwustopniowego, znacznie (niemal o 100 %) zwiększa koszty inwestycyjne linii w porównaniu z kosztami linii z rozdmuchiowaniem jednostopniowym. Poza tym uniwersalność zastosowania tych linii jest ograniczona, gdyż pod względem ekonomicznym opłacalne jest wytłaczanie w takiej linii tylko folii orientowanych. Dlatego firma Windmüller & Hölscher (Niemcy) poleca urządzenia, których podstawowymi elementami są zespoły drugiego stopnia rozdmu-

chiwania i nawijania folii [34]. Urządzenie może współpracować z linią do wytłaczania z jednostopniowym rozdmuchiowaniem folii, bądź też do tego urządzenia mogą być dostarczone zwoje folii. Stopnie rozciągnięcia folii wynoszą: poprzeczny od 1:1 do 1:3, wzdłużny od 1:1 do 1:5. Rękaw folii przed rozciąganiem nagrzewa się przy użyciu gorącej wody, następnie po rozciągnięciu folię poddaje się procesowi stabilizacji cieplnej, po którym następuje nawijanie. Podsumowując, warto podkreślić, że linię do wytłaczania z rozdmuchiowaniem dwustopniowym folii stosuje się znacznie rzadziej niż linię do wytłaczania z rozdmuchiowaniem jednostopniowym.

LITERATURA

1. Hensen F., Knappe W., Potente H.: „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1986, str. 76—124, 267.
2. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993, str. 427.
3. Stasiak J., Czerniawski B.: *Polimery* 1999, **44**, 579.
4. Beulich J., Cook M.: *Kunststoffe* 2001, **91**, 256.
5. Beer G. i in.: *Kunststoffe* 2002, **92**, 36.
6. Wolfsberger A. i in.: *Kunststoffe* 2002, **92**, 44.
7. Czerniawski B., Stasiak J.: *Plast. Rev.* 2002, nr 6(19), 30.
8. Piekarska E.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2003, **9**, 167.
9. Feistkorn W., Herschbach Ch.: *Kunststoffe* 1995, **85**, 1707.
10. Herschbach Ch.: *Kunststoffe* 2002, **92**, 35.
11. Łukacz J. E., Pietukhov A. D., Senatos V. A.: „Oborudovanie dlia proizvodstva polimernykh plenok”. Mashinostroenie, Moskwa 1981.
12. Hensen F. H., Hessenbruch R. H.: *Kunststoffe* 1993, **83**, 338.
13. Cribbs L. W.: „Advances in UHMW-PE technology”, Konferencja „Polyethylene Films 2002”, Filadelfia, wrzesień 2002 r., materiały.
14. Schmitz G.: *Kunststoffe* 1995, **85**, 12.
15. Mayer A., Butler T., Yap P.: *Kunststoffe* 1997, **87**, 1584.
16. Fischer P.: *Plastverarbeiter* 2000, **51**, 58.
17. Spirgatis J., Wortberg J.: *Kunststoffe* 2000, **90**, 108.
18. Rafael J., Castillo M.: „Extrusion technologies for the new millennium”, VI Międzynarodowe Targi Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych PLASTPOL 2002, Kielce, maj 2002 r., materiały.
19. Rohse N., Bailey P., Ohlsson S.: *Kunststoffe* 1997, **87**, 1374.
20. La Mantia F. P.: *Macplas Intern. E 200* 2000, nr 5, 125.
21. Informacja firmy Kuhne (Niemcy): *Plastverarbeiter* 1998, **49**, nr 5, 74.
22. Czerniawski B.: *Opakowanie* 2002, nr 6, 9.
23. Materiały informacyjne firm Environmental Polymers Group PLC (W. Brytania) i Novasol Sr1, Napoli (Włochy).
24. Stasiak J.: *Polimery* 2003, **48**, 194.
25. Bohdan M., Bohdan Z.: *Opakowanie* 2003, nr 2, 40.
26. Voß K. P.: *Kunststoffe* 1995, **85**, 1309.
27. Informacja dotycząca firmy Polytech S.P.A.: *Kunststoffe* 2000, **90**, 120.
28. Materiały informacyjne firmy Polytech S.P.A., Marano Ticino, Włochy.
29. Materiały informacyjne firmy Macro Engineering—Technology Inc., Kanada.
30. Anonim: *Tworzywa* 2001, **4**, nr 2, 52.
31. *Pat. pol.* 80 824 (1970).
32. Żenkiewicz M.: *Radiat. Phys. Chem.* 2004, **69**, 373.
33. Żenkiewicz M., Czupryńska J.: „Wybrane zagadnienia modyfikowania radiacyjnego”, Wydawnictwo Akademii Bydgoskiej, Bydgoszcz 2003.
34. Informacja dotycząca urządzenia firmy Windmüller & Hölscher (Niemcy), „Noch dünnere Folien”, *K-Zeitung* 1/2 — 21.01.1999, 16.

Otrzymano 20 VII 2004 r.