

WYBRANE PROBLEMY PROCESU WYTŁACZANIA TWORZYW POLIMEROWYCH ■ CZ. 3

Wytłaczarki jednoślিমakowe – charakterystyka układu uplastyczniającego

Proces wytłaczania tworzyw sztucznych jest realizowany w wytłaczarkach, zbudowanych z układów – uplastyczniającego, napędowego, sterowania oraz narzędzia, a więc głowicy.

Proces uplastyczniania tworzyw zachodzi w układzie uplastyczniającym, przed którym stoją cztery podstawowe zadania, tj. ogrzanie materiału, jego sprężanie, mieszanie oraz transport do narzędzia. Duża liczba rozwiązań konstrukcyjnych układów uplastyczniających wytłaczarek świadczy o tym, iż proces uplastyczniania należy do bardzo złożonych. Musi on bowiem uwzględniać – oprócz podstawowych zadań – wiele innych problemów, takich jak otrzymanie wyrobów dobrych jakościowo czy efektywne uplastycznianie materiałów trudno przetwarzalnych, np. niestabilnych termicznie lub o bardzo dużej czy bardzo małej lepkości. W tym celu, oprócz układów jednoślimakowych, stosowane są układy: wieloślimakowe, mieszane, bezślimakowe (tłokowe, pompy zębate).

■ Strefy geometryczne ślimaka

Wytłaczarki jednoślimakowe są najczęściej stosowane do wytłaczania tworzyw sztucznych. Pierwsze takie wytłaczarki posiadały krótkie cylindry i ślimaki, a kanały jednozwojowych ślimaków miały dużą głębokość, co powodowało znaczną niejednorodność mechaniczną i termiczną materiału na końcu układu uplastyczniającego. W latach 50. ub.w. pojawiły się ślimaki trójstrefowe (ze strefą zasilania, sprężania i dozowania, rys. 1A), charakteryzujące się już znacznie większą długością i mniejszą głębokością kanałów. Zwiększona długość ślimaka powodowała zwiększenie czasu przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym, natomiast zmniejszenie głębokości kanału umożliwiło poprawę warunków ogrzewania materiału poprzez przewodzenie ciepła od ścianek cylindra i ślimaka, jak również zamianę energii mechanicznej ślimaka na

ciepło w wyniku procesów tarcia oraz ścinania w tworzywie.

Obecnie konwencjonalne wytłaczarki jednoślimakowe mają długość ślimaków rzędu 20-36 D. Ich prędkości obwodowe przy przetwórstwie tworzyw stabilnych termicznie wynoszą 0,5-0,8 m/s, a dla materiałów niestabilnych cieplnie – ok. 0,3 m/s. Wytłaczarki szybkobieżne (autotermiczne, adiabatyczne) mają prędkość obwodową ślimaka w granicach 1,0 – 2,5 m/s, choć znane są wytłaczarki pracujące z prędkością obwodową ślimaków powyżej 4 m/s. Zaletą tego typu maszyn jest niewątpliwie bardzo małe jednostkowe zużycie energii, a więc duża sprawność energetyczna całego układu uplastyczniającego, mimo to ich zastosowanie jest ograniczone z uwagi na znaczne przegrzewanie się tworzyw o dużej lepkości oraz brak możliwości przetwarzania materiałów niestabilnych termicznie, jak np. PVC.

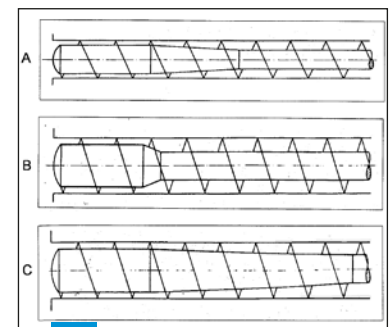
W procesie wytłaczania istotną rolę odgrywają właściwości

tworzywa, takie jak postać surowca, lepkość w warunkach wytłaczania, temperatura mięknienia i jej zakres oraz temperatura rozkładu. Jeśli proces wytłaczania ma być prowadzony w sposób optymalny, do każdego materiału należy w sposób indywidualny dobrać ślimak o konkretnej charakterystyce:

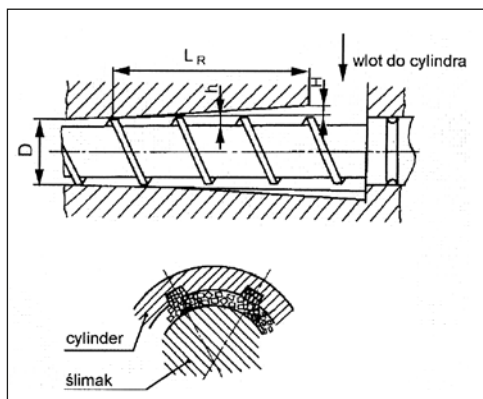
- Długość strefy zasilania ślimaka powinna być tym większa, im wyższa jest temperatura mięknienia tworzywa, przy czym niekiedy redukuje się jej długość kosztem wstępnego podgrzania materiału.
- Długość strefy sprężania powinna być tym większa, im większy jest zakres temperatury mięknienia. Tworzywa amorficzne, jak PS, PC czy PMMA wykazują dość duży zakres temperatur mięknienia, natomiast krystaliczne, jak POM czy PA topią się w zakresie zaledwie kilku stopni, zatem do ich wytłaczania stosuje się ślimaki z krótką (1-2D) strefą sprężania (rys.

1B). Nieco inaczej jest w przypadku tworzyw łatwo odkształcalnych, jak LDPE, gdzie można stosować nawet ślimaki dwustrefowe z długą strefą sprężania (rys. 1C), w której niestopione jeszcze ziarna materiału ulegają od początku powolnemu ściskaniu.

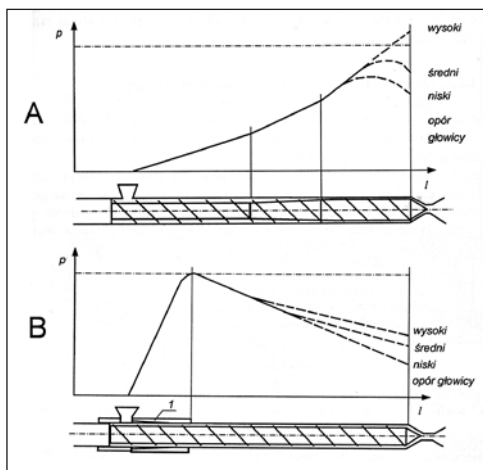
- Optymalny stopień sprężania ślimaka (stosunek wysokości kanału ślimaka w strefie zasilania do jego wysokości w strefie dozowania) powinien być większy od stosunku



Rys. 1. Typowy ślimak trójstrefowy (A), ślimak trójstrefowy z krótką strefą sprężania (B) oraz ślimak dwustrefowy z długą strefą sprężania (C)



Rys. 2. Schemat jednoślismakowego układu uplastyczniającego z cylindrem rowkowanym, :
 L_R – długość czynna rowków, h – wysokość kanału ślimaka, H – maks. wysokość rowków w cylindrze
 (Opracowano na podst. Stasiak J., Wytłaczanie tworzyw polimerowych Zagadnienia wybrane, WUUTP, Bydgoszcz 2007)



Rys. 3. Rozkład ciśnienia w układzie uplastyczniającym: klasycznym (A) oraz niekonwencjonalnym z cylindrem rowkowanym (B)
 (Opracowano na podst.: Wilczyński K., Przetwórstwo tworzyw sztucznych, Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2000)

gęstości stałego tworzywa do jego gęstości nasypowej. Zatem materiał w postaci proszku będzie wymagać ślimaka o większym stopniu sprężania niż ten sam materiał w postaci granulatu. Parametr ten zależy także od lepkości materiału w warunkach wytłaczania i tak dla tworzyw amorficznych, wykazujących dużą lepkość stopu wskazane są ślimaki o małym stopniu sprężania, aby uniknąć przegrzewania intensywnie ścinanego materiału oraz nadmiernego obciążenia układu napędowego ślimaka. Nie wielkie stopnie sprężania, rzędu 2 zalecane są również przy przetwórstwie tworzyw

niestabilnych termicznie, jak PVC, dla których zbyt duży stopień sprężania mógłby spowodować degradację materiału. Dla stabilnych termicznie tworzyw semikrystalicznych, jak PE czy PP stosować można duże stopnie sprężania, rzędu 4 i więcej.

Przedstawione zależności wskazywałyby na konieczność dysponowania dużą liczbą ślimaków, aby przy każdej zmianie surowca uzyskać optymalne warunki wytłaczania. W praktyce jest to oczywiście niemożliwe, choć w pewnych warunkach istnieje możliwość „dopasowania” ślimaków do innych tworzyw poprzez zmianę regulowalnych paramet-

trów pracy wytłaczarki, takich jak prędkość obrotowa ślimaka czy temperatury stref grzejnych. I tak np. ślimak do LDPE można wykorzystać do wytłaczania PP przy nieco większych prędkościach obrotowych a ślimak do PS może służyć do przetwórstwa PC przy odpowiednio podwyższonych temperaturach stref grzejnych.

Układy z rowkowanymi cylindrami

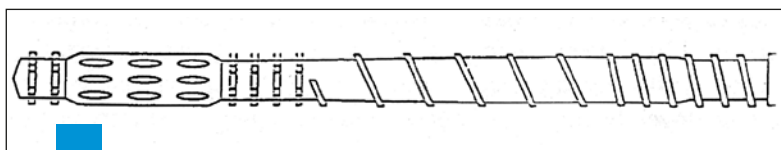
Podstawową rolę w układzie uplastyczniającym wytłaczarki odgrywa ślimak, a przede wszystkim zwój, który wywołuje ruch tworzywa w wytłaczarce. Jest to tzw. transport wleczony. Na natężenie przepływu tworzywa wpływa nie tylko kąt pochylenia zwoju, ale przede wszystkim prędkość obrotowa ślimaka, różnica współczynników tarcia tworzywo-cylinder oraz tworzywo-ślismak oraz wielkość (skierowanej przeciwnie do kierunku transportu materiału) składowej ciśnieniowej oraz przeciekowej. Dlatego też efektywność transportu ślimaka trójstrefowego nie przekracza 20-30% sprawności teoretycznej, liczonej jako iloczyn objętości skokowej kanału, prędkości obrotowej ślimaka oraz gęstości nasypowej tworzywa. Szybkość transportową materiału w wytłaczarce (przy stałej szybkości obracającego się ślimaka) można zatem poprawić, zmieniając współczynniki tarcia, przede wszystkim zwiększając tarcie tworzywo-cylinder. Efektywnym sposobem zwiększenia tarcia tworzywa względem wewnętrznej powierzchni cylindra jest wykonanie rowków na części jej długości, w części zasypowej i zasilania wytłaczarki (rys. 2).

Równoległe do osi, stopniowo zanikające rowki o długości czynnej 3-5 D, wykonane w wewnętrznej, cylindrycznej powierzchni tulei - powodują blokowanie obwo-

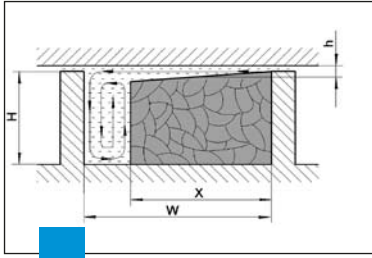
dowej składowej ruchu tworzywa w kanale ślimaka, wymuszając składową osiową ruchu. Dzięki temu efektywność transportu tworzywa wzrasta nawet kilkakrotnie, osiągając ponad 80% sprawności teoretycznej. Wskutek większego tarcia w strefie rowkowanej wydziela się duża ilość ciepła, która mogłaby doprowadzić do przedwczesnego uplastycznienia się tworzywa i jego przywierania do walcowej części ślimaka, obracając się razem z nim. Dlatego strefa rowkowana jest chłodzona, niekiedy intensywnie.

Zastosowanie strefy rowkowanej w istotny sposób określa sposób pracy wytłaczarki. W maszynach z cylindrem gładkim ciśnienie w układzie uplastyczniającym rośnie na prawie całej długości, osiągając niekiedy maksimum w strefie dozowania - i ta strefa wyznacza wydajność całego procesu (rys. 3A). Wytłaczarki tego typu charakteryzują się zależnością wydajności od oporów przepływu w głowicy, co oznacza małą stabilność całego procesu. W wytłaczarkach z cylindrem rowkowanym ciśnienie jest wytwarzane w strefie rowkowanej (rys. 3B), która w tym przypadku wyznacza wydajność wytłaczania. Maszyny tego typu charakteryzują się większą wydajnością oraz brakiem zależności wydajności od oporów przepływu tworzywa w głowicy od wytłaczarek z gładkimi cylindrami, co oznacza dużą stabilność procesu.

Wytłaczarki z rowkowaną strefą cylindra posiadają jednak istotne wady. Wymagają stosowania silniejszego napędu, charakteryzują się dużym zużyciem rowków, ponadto istnieje możliwość zalegania tworzywa w rowkach. Z powodu dużej prędkości transportowej, krótszy czas przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym może spowodować niedostateczną jednorodność materiału na końcu tego



Rys. 4. Ślimak dwustopniowy, skonstruowany do współpracy z cylindrem rowkowanym
 (Oprac. Na podst. Misterek B., Wytłaczarki jednoślismakowe, Układ cylinder-ślismak, Plastech 99, Plastech WPKT, Warszawa 1999)



Rys. 5. Przekrój kanału ślimaka w strefie stapiania

układu, jednak ten problem korygują specjalne rozwiązania konstrukcyjne ślimaków, np. strefa barierowa oraz elementy intensywnego ścinania i mieszania na końcu ślimaka. Silne sprężanie zimnego jeszcze tworzywa jest bardzo energochłonne, co znacząco obniża sprawność energetyczną całego procesu. Intensywne sprężanie tworzyw łatwo odkształcalnych pozwoli usunąć powietrze nawet spomiędzy zimnych ziaren (jak w ślimaku dwustrefowym), na-

tomiast niemożliwe jest odgazowanie tworzyw sztywnych. Stąd układy z rowkowanym cylindrem znajdują zastosowanie przede wszystkim do intensywnego wytłaczania poliolefin na wyroby masowe, jak rury czy folie. Jednak klasyczny ślimak trójstrefowy nie współpracuje optymalnie z rowkowanym cylindrem. Opracowano zatem różne typy ślimaków bardziej odpowiednich do tego celu, z których przykładem może być tzw. ślimak dwustopniowy (rys. 4). Składa się on z części początkowej o skoku zwoju ok. 0,4 D, natomiast w pozostałej części ślimak posiada skok zwoju rzędu 0,8-1,0 D. Zaopatrzony jest ponadto w strefę intensywnego mieszania oraz nasadkę mieszającą. Mały skok linii śrubowej w strefie pokrywającej się z rowkowaną częścią cylindra spr-

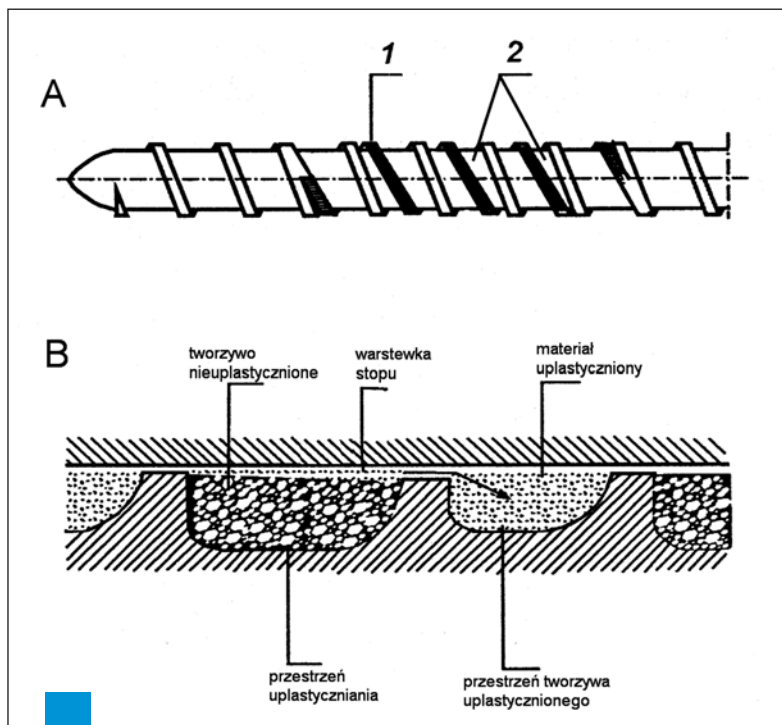
wia, że materiał dłużej przebywa w kanale ślimaka, co znacznie poprawia proces ogrzewania materiału. Ciśnienia uzyskiwane w takich układach są mniejsze niż w systemie klasycznym, jednak przy zachowanej wciąż dużej wydajności wytłaczarki.

■ Elementy intensywnego mieszania i ścinania

Wydajność wytłaczarek ograniczona jest obecnie nie tyle zdolnością transportową ich układów uplastyczniających, lecz bardziej wymogami poprawnego, całkowitego uplastycznienia materiału, odpowiedniego rozdrobnienia dodatków oraz ich równomiernego rozprowadzenia w całej objętości. Procesy rozdrabniania związane są z tzw. mieszaniem ścinającym, natomiast za

ujednorodnianie składu materiału odpowiedzialne jest tzw. mieszanie rozprowadzające. W procesie wytłaczania z zastosowaniem klasycznego ślimaka trójstrefowego zachodzi praktycznie wyłącznie mieszanie rozprowadzające. W praktyce okazało się, że ślimaki trójstrefowe, nawet optymalnie dobrane pod kątem rodzaju przetwarzanego materiału, nie są w stanie dostarczyć do głowicy z dużą wydajnością strumienia dobrze zhomogenizowanego materiału. Wynika to z mechanizmu sprężania tworzywa w czasie ogrzewania – ziarna tworzywa mięknie i topiąc się, łączą się ze sobą tworząc lity blok materiału stałego, wypełniając kanał ślimaka.

W obszarze tym nie następuje wzajemne przemieszczanie cząstek stałego tworzywa, a materiał topi się przy powierzchni styku



Rys. 6. Ślimak Maillefera (A): 1 – dodatkowy zwój, 2 – przestrzeń gromadzenia się stopionego tworzywa, (B) – przekrój poprzeczny kanału ślimaka w strefie sprężania (Opracowano na podst.: Wilczyński K., Przetwórstwo tworzyw sztucznych, Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2000)

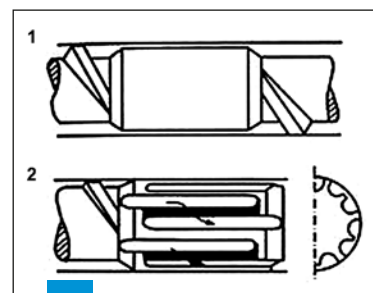
z gorącym cylindrem, gdzie powstaje cienka warstewka stopionego materiału o średniej grubości h (rys. 5), poddawana ścinaniu (i często przegrzewaniu) wynikającemu z wzajemnego ruchu względnego ślimaka i cylindra. Stopiony materiał jest zbierany przez czynny zwój kanału ślimaka i gromadzony w przedniej części kanału. Ilość materiału stałego na długości kanału ślimaka wprawdzie się zmniejsza, ale zmniejszeniu ulega nie jego wysokość, a szerokość X . Stąd mimo ciągłego zwiększania długości układów uplastyczniających wytłaczarek, zdarzają się wciąż sytuacje, gdy tworzywo nie zostaje w sposób całkowity uplastycznione, a materiał stały w szczątkowych ilościach dostaje się do głowicy, a nawet do gotowego wyrobu, pogarszając jego właściwości i zakłócając przebieg całego procesu. W celu przeciwdziałania tego typu sytuacjom oraz poprawy rozdrobnienia dodatków, jak również homogenizacji składu stopionego tworzywa opracowa-

no różne elementy konstrukcyjne ślimaków, które podzielić można na dwie podstawowe grupy:

- elementy intensyfikujące proces uplastyczniania,
- elementy homogenizujące tworzywo:
 - elementy mieszająco-ścińjące,
 - elementy mieszająco-rozprowadzające,
 - elementy przedłużające czas przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym.

Przykładem ślimaka z elementem intensyfikującym proces uplastyczniania jest tzw. ślimak Maillefera (rys. 6). Zawiera on w strefie sprężania, gdzie przebiega proces uplastyczniania, dodatkowy zwój o nieco większym skoku oraz mniejszej (o ok. 0,5 – 1mm) wysokości, tworząc szczelinę pomiędzy jego grzbietem a powierzchnią wewnętrzną ślimaka. Występują tam więc dwa kanały: stopniowo zmniejszający swoją szerokość

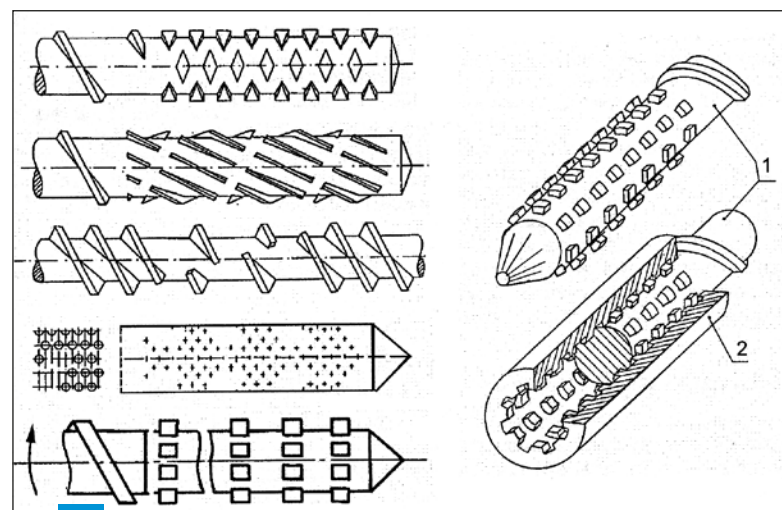
kanal pierwotny, w którym znajduje się tworzywo nieuplastycznione oraz stopniowo rozszerzający się kanał wtórny, do którego jest przeciskane tworzywo uplastycznione z części pierwotnej w miarę topnienia materiału stałego. W kanale pierwotnym tworzywo nieuplastycznione występuje bez uplastycznionej otoczki stopu, dzięki czemu podlega ścinaniu w całej objętości i szybko ulega uplastycznieniu. Dodatkowo unika się nadmiernego ścinania materiału stopionego w warstewce przy cylindrze. W praktyce spotkać można liczne rozwiązania podobne do pierwotnego ślimaka Maillefera, jak ślimak Barra, Draya, Kima czy Ingen Housz, różniące się głównie przekrojami kanałów.



Rys. 7. Elementy intensywnego ścinania: 1 – element typu „torpeda”, 2 – element Maddocka (Opracowano na podst.: Wilczyński K., Przetwórstwo tworzyw sztucznych, Oficyna Wyd. PW, Warszawa 2000)

Wysoką wydajność wytwarzania wyrobu o wymaganej jakości, szczególnie w układach z rowkowaną strefą zasilania, umożliwiają tylko ślimaki zaopatrzone w odpowiednie elementy homogenizujące tworzywo, tj. ścinające i mieszające na ich końcu. Stosowanie tych elementów powoduje jednak wzrost mocy pobieranej przez napęd, a równocześnie wzrost temperatury uplastycznionego tworzywa. Element taki działa jak dławik, obniżając wydajność wytłaczania, lecz umożliwia prowadzenie procesu przy wyższych prędkościach obrotowych ślimaka i zapewnia otrzymanie odpowiednio ujednorodnionego materiału, a więc i optymalnej jakości wyrobu. Jego geometrię dobiera się w zależności od właściwości przetwarzanego materiału oraz systemu układ uplastyczniający-głowica, umieszczając na końcu ślimaka lub w odległości 5-7 D od jego końca.

Celem elementów ścinających jest przede wszystkim przyspieszenie równomiernego uplastycznienia tworzywa poprzez zamianę energii mechanicznej napędu ślimaka w energię cieplną, w warunkach dużych szybkości ścinania uplastycznianego materiału w niewysokiej temperaturze. Mimo różnej zasady



Rys. 8. Elementy intensywnego mieszania (po lewej) oraz elementy intensywnego mieszania umieszczone na ślimaku i cylindrze (po prawej) (Opracowano na podst. Stasiak J., Wytłaczanie tworzyw polimerowych Zagadnienia wybrane, WUUTP, Bydgoszcz 2007)

działania spełniają podobne zadanie jak dodatkowy zwój w ślimaku Maillefera.

Zadaniem elementów rozpraszających jest homogenizacja uplastycznionego tworzywa opuszczającego element ścinający, dzięki zastosowaniu układu mieszającego umieszczonego w strefie relaksacji, tj. strefie o zwiększonej wysokości kanałów. Przykłady konstrukcji elementów intensyfikujących proces mieszania rozpraszającego przedstawiono na rys. 8. Strumień tworzywa ulega w nich wielokrotnemu podziałowi na mniejsze strugi, które łączą się ze sobą w innych konfiguracjach, co powoduje intensywne mieszanie uplastycznionego materiału.

Umieszczenie ich w strefie dekompresji (relaksacji) za ele-

mentami ścinającymi umożliwia także odzyskanie kontroli nad temperaturą stopionego tworzywa, która znacznie wzrastała podczas przepływu materiału w elementach ścinających.

■ Mieszalniki statyczne i dynamiczne

Jeżeli przetwarzanemu tworzywowi stawia się szczególnie wysokie wymagania dotyczące jego jednorodności składu lub temperatury, pomiędzy cylindrem i głowicą można zainstalować tzw. mieszalnik statyczny, którego działanie polega na wielokrotnym podziale strug stopionego tworzywa na mniejsze i łączeniu ich w odmiennych konfiguracjach.

Podobną rolę spełniają nasadki przedłużające ślimak i cylinder, tzw. mieszalniki dynamiczne, których przykładem jest przedstawiony na rys. 10 mieszalnik wnekowy Staromix. W jego cylindrycznych powierzchniach roboczych wykonane są kuliste lub wzdłużne zagłębienia, które powodują zaburzenia w przepływie tworzywa przez szczelinę pomiędzy tzw. statorem (część cylindryczna) i rotorem (przedłużenie ślimaka). Tutaj również strumień materiału ulega ciągłym podziałom na strugi, łączone dalej w innych konfiguracjach.

Urządzenia te stosowane są przede wszystkim do sporządzania kompozycji polimerowych z pigmentami.

■ Regulacja ciśnienia tworzywa na wejściu do głowicy

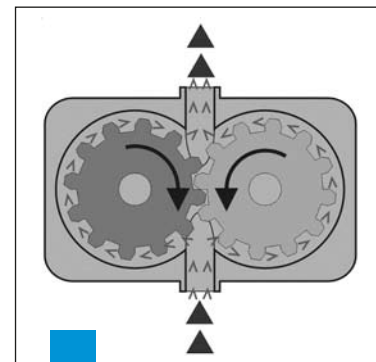
Układ cylinder-ślimak doprowadza ujednorodniony strumień uplastycznionego tworzywa do głowicy pod odpowiednim ciśnieniem. Każda głowica wylączarska wykazuje pewien opór hydrauliczny, który określa niezbędny poziom ciśnienia na jej wejściu. Idealna sytuacja ma miejsce, gdy wymagania ciśnieniowe głowicy i końca układu uplastyczniającego są zgodne – można wówczas bezpośrednio połączyć głowicę z cylindrem wylączarki. Jeżeli wymagane ciśnienie na wejściu głowicy jest mniejsze od ciśnienia uzyskanego na końcu układu uplastyczniającego, między cylindrem a głowicą instaluje się element zwiększający opór hydrauliczny. Przykładami takich elementów są płyty sitowe (plus ewentualne dodatkowe siatki) lub zawór dławiący. Zaletą zaworu jest możliwość regulacji ciśnienia bez przerywania procesu wylączania, chociaż ostatnio znaleźć można rozwiązania umożliwiające zmianę płyt sitowych również w trakcie pracy linii technologicznej (rys. 11). Jeśli głowica stwarza bardzo duży opór hydrauliczny, można sprzęgnąć układ uplastyczniający z głowicą, licząc się z nadmiernym, nieuzasadnionym wzrostem ciśnienia w cylindrze. Mając na uwadze, iż wydajność całego procesu zależy od ciśnienia tworzywa na końcu układu uplastyczniającego (dla układów z cylindrem gładkim), korzystnym rozwiązaniem jest instalacja między cylindrem a głowicą pompy zębatej (rys. 12). Pompa ta podnosi ciśnienie przed głowicą bez obniżania wydajności całego procesu.

■ Podsumowanie

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost wydajności pracy wylączarek jednoślismakowych, co odbywa się poprzez:



Rys. 11. Zmieniacz sit, umożliwiający zmianę sit w trakcie pracy linii technologicznej (Oprac. na podst.: materiały f-my Zakład Mechaniczny Paweł Ciborski)



Rys. 12. Pompa zębata

- zastosowanie w strefie zasypu i zasilania rowkowanego cylindra,
- umieszczenie na ślimaku stref intensywnego ścinania i mieszania,
- zwiększenie momentu napędowego ślimaka.

Na rynku wylączarek jednoślismakowych występuje coraz silniejsza tendencja do produkcji maszyn specjalistycznych (przeznaczonych do przetwórstwa określonego tworzywa i otrzymywania konkretnego wyrobu) zamiast uniwersalnych. Wylączarki takie charakteryzują się dużą wydajnością wylączania oraz zapewniają optymalne właściwości wyrobów.

Jacek Iwko

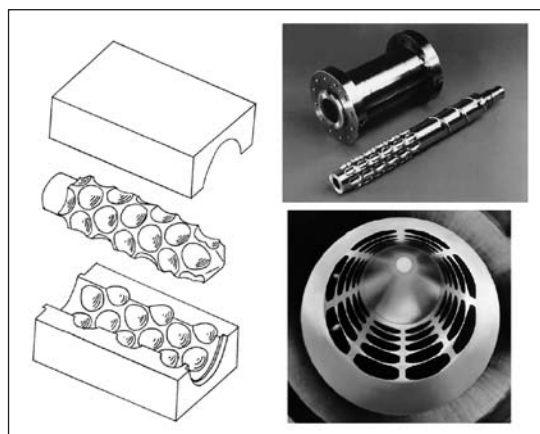
Laboratorium Tworzyw Sztucznych
Politechnika Wroclawska

Literatura:

1. Stasiak J., Wylączanie tworzyw polimerowych. Zagadnienia wybrane, Wyd. Uczelniane Uniwersytetu Technologicznego – Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2007
2. Wilczyński K., Przetwórstwo tworzyw sztucznych, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000
3. Misterek B., Wylączarki jednoślismakowe, układ cylinder – ślimak, mat. Plastech 99, Plastech Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, Warszawa 1999



Rys. 9. Przykłady mieszalników statycznych dla tworzyw o dużej lepkości (na górze) i dla kompozytów polimerowych (na dole) (Oprac. na podst.: materiały f-my Northland Engineering Sales, Inc.)



Rys. 10. Mieszalnik dynamiczny wnekowy Staromix f-my Reifenhäuser (Oprac. na podst.: materiały f-my Reifenhäuser)