

JOACHIM STASIEK¹⁾, TADEUSZ NIESZPOREK²⁾

Problemy projektowania i wykonywania ślimaków dwuślimakowych wytłaczarek przeciwbieżnych^{*)}

PROBLEMS OF ENGINEERING DESIGN AND PRODUCTION OF SCREWS IN COUNTER-ROTATING TWIN-SCREW EXTRUDERS

Summary — Sequence of basic steps required during conceptual design of twin-screw plasticizing systems has been presented (Fig. 2). Bibliographic data allowed analysis of intermeshing flows to be performed and their effect on the plasticizing process was determined. Results of investigating the axial and frontal screw outline were presented, confirming changeability of the screw outline course in different cross-sections along screw axis. Change in the angle of flight flank inclination along the screw zone (β) requires appropriate change in the channel width, b , along this zone to maintain the existing intermeshing gap (Fig. 3.). Also, in zones where the screw helix angles (ϕ_{st}) exceed 35° and difference of helix angles ($\phi_w - \phi_z$) $> 15^\circ$, suitable enhancing of side inter-screw gap or scarfing of the flight edges are required to attain its appropriate minimum value (> 0.5 mm). Gap between the interacting screws varies at different locations of the flank surface of the flights — e.g. is higher in axial cross-section as compared with the plane perpendicular to flight inclination on the pitch diameter of screws (Fig. 11). Shape of the side intermeshing gap should be approximately rhomboidal (Fig. 3), i.e. the difference of the side inter-screw gap ($S_{b\ max.} - S_{b\ min.}$) should be from 0.1 to 0.3 mm, to maintain mass flowing through the gap along its width, h_e , under approximately identical shearing rate.

Key words: counter-rotating twin-screw extruders, engineering design, selection of intermeshing gap, technology limitations.

Istnienie znacznej liczby konstrukcyjnych rozwiązań wytłaczarek ślimakowych świadczy o złożoności problematyki wytłaczania tworzyw wielkocząsteczkowych. W celu zwiększenia wydajności wytłaczania, polepszenia jakości wytworów, a zwłaszcza efektywniejszego uplastyczniania tworzyw trudno przetwarzalnych (w tym niestabilnych cieplnie) opracowano, oprócz wciąż często stosowanych wytłaczarek jednoślimakowych, wytłaczarki wieloślimakowe — liniowe, planetarne, kaskadowe i inne [1—5]. Wśród wytłaczarek wieloślimakowych najszerze zastosowanie znalazły wytłaczarki dwuślimakowe.

Stosowane są wytłaczarki dwuślimakowe zarówno o przeciwbieżnym, jak i współbieżnym kierunku obro-

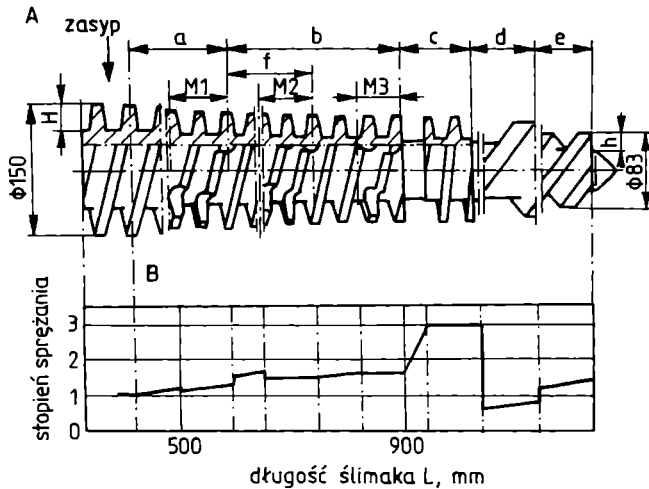
tów ślimaków; mają one ślimaki o zwojach ząbujących się nieszczelnie, tzn. z określonymi luzami międzyzwojowymi, które spełniają istotną rolę w procesie uplastyczniania. Wytłaczarki współbieżne charakteryzujące się znaczną efektywnością mieszania są powszechnie używane w liniach do wytwarzania kompozytów polimerowych, natomiast wytłaczarki przeciwbieżne (stanowiące przedmiot niniejszego artykułu), ze względu na nieznaczne rozpraszanie energii mechanicznej napędu ruchu ślimaków, stosuje się przede wszystkim w przetwórstwie PVC. Dlatego też w niniejszym opracowaniu jako przetwarzany polimer rozpatrujemy wyłącznie PVC.

Rozróżnia się dwa podstawowe kształty geometryczne ślimaków, mianowicie ślimaki walcowe i stożkowe. Rysunek 1 przedstawia zmodyfikowane rozwiązanie ślimaka stożkowego zawierającego strefy zasilania, wstępnego podgrzewania, mieszania, sprężania, odgazowania i dozowania [6]. W końcowych odcinkach strefy wstępnego podgrzewania i środkowych odcinkach strefy mieszania zwoje mają wycięcia promieniowe, tzw. wybrania mieszające. Takie rozwiązanie konstrukcyjne,

¹⁾ Instytut Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Metalchem, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55, 87-100 Toruń.

²⁾ Politechnika Częstochowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa.

^{*)} Wykład wygłoszony w ramach VI Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Poraj, 19—22 czerwca 2001 r.



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny zmodyfikowanego ślimaka (A) oraz modelowy przebieg zmian stopnia sprężania (B); strefy ślimaka: a — zasilania, b — wstępnego podgrzewania i mieszania, c — sprężania, d — odgazowania, e — dozowania; M_1 , M_2 , M_3 — mieszające odcinki ślimaków, f — odcinek końcowego wymieszania polimeru z dodatkami, $H/h = 1,5$

Fig. 1. Scheme of modified screw construction (A) and model course of compression degree changes (B); screw zones: a — feeding, b — initial heating and mixing, c — compression, d — degassing, e — metering, M_1 , M_2 , M_3 — mixing screw segments, f — final polymer compounding zone with additives, $H/h = 1.5$

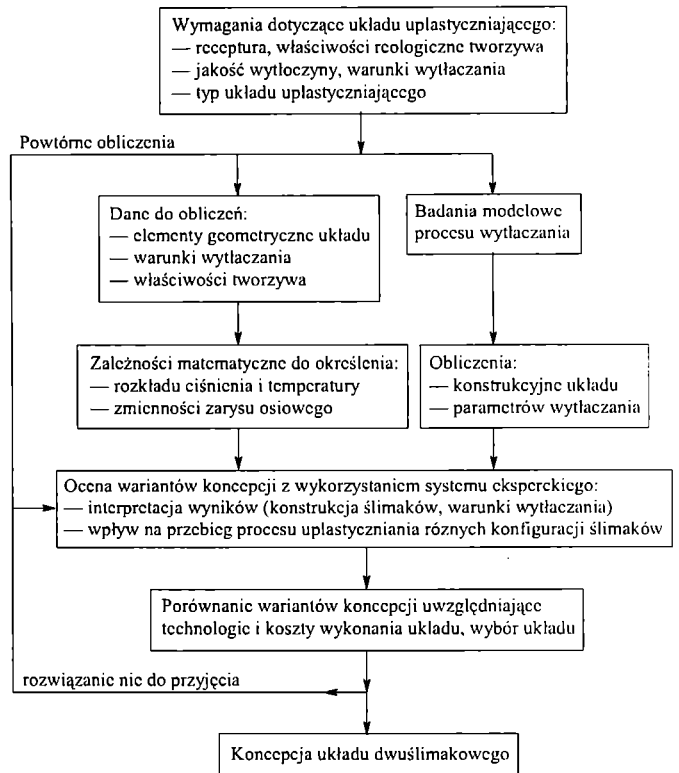
w tym odpowiednia zmiana redukcji objętości kanałów wzdłuż stref, zapewnia uzyskanie znacznie korzystniejszego przebiegu procesu końcowego wymieszania tworzywa w strefie mieszania [7—9]. Konstrukcja ślimaków musi także zapewniać odpowiednie natężenie przepływu materiału w poszczególnych strefach ślimaków, tj. większą wydajność transportowania w strefach odgazowania i dozowania niż w strefie zasilania w celu uzyskania niecałkowitego wypełnienia kanałów strefy odgazowania wstępnie uplastycznionym tworzywem.

OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROCESU PROJEKTOWANIA DWUŚLIMAKOWYCH UKŁADÓW UPLASTYCZNIAJĄCYCH

W procesie projektowania przeciwbieżnych układów ślimakowych przeważają działania doświadczalne wspomagane wybranymi obliczeniami teoretycznymi w przeciwieństwie do projektowania układów współbieżnych, gdzie korzysta się również z symulacyjnych programów komputerowych dotyczących wydajności wytłaczania oraz rozkładu ciśnienia i temperatury tworzywa wzdłuż układu uplastyczniającego.

Na schemacie I przedstawiono kolejność postępowania podczas opracowywania projektu koncepcyjnego dwuślimakowego układu uplastyczniającego.

We współczesnym ujęciu zintegrowanych procesów rozwoju produkcji szczególne miejsce zajmują metody



Schemat I

„inżynierii równoczesnej” [10]. Projektowanie „równoczesne” to na ogół praca grupowa konstruktorów, technologów procesu wytłaczania, specjalistów od oceny właściwości fizycznych tworzyw oraz technologów wykonywania układów uplastyczniających [11].

Badania doświadczalne realizowane w uproszczonych liniach technologicznych wytłaczania traktuje się jako badania modelowe. Wykorzystując wyznaczone przy tym zależności, z założeniem podobieństwa energetycznego [12], można określić podstawowe cechy konstrukcyjne projektowanego układu uplastyczniającego i warunki wytłaczania tworzywa.

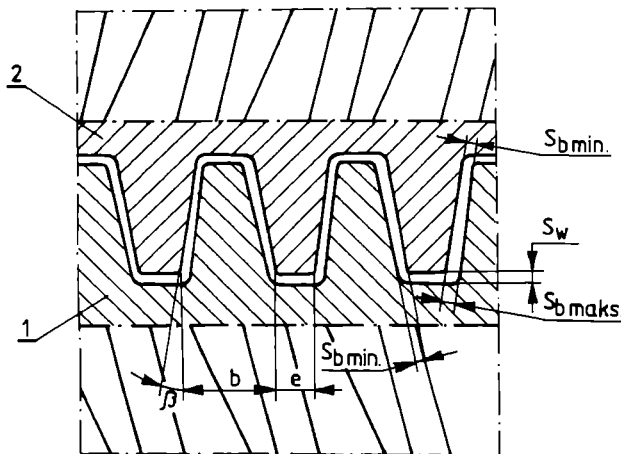
Jedną z podstawowych czynności w procesie opracowywania projektu koncepcyjnego (nowego lub zmodyfikowanego układu uplastyczniającego wytłaczarki) jest dobór luzów międzyzwojowych w poszczególnych strefach ślimaków, uwzględniający możliwości wykonawcze w procesie wytwarzania ślimaków. Celem niniejszej pracy była analiza przepływów międzyzwojowych oraz ich wpływu na przebieg procesu uplastyczniania. Ponadto przedstawiono analizę geometrycznego zarysu osiowego i czołowego ślimaków, a także możliwości uzyskania odpowiedniej wartości luzów międzyzwojowych w procesie obróbki ślimaków stożkowych.

PRZEPIY W TWORZYWA W OBSZARZE ZAZĘBIANIA SIĘ ŚLIMAKÓW

Jednym z zasadniczych wymagań stawianych wytłaczarkom do przetwórstwa tworzyw termoplastycznych

jest odpowiedni stosunek wydajności wytłaczania do szybkości obrotowej ślimaka, zapewniający zarówno krótki czas przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym, jak i małą częstotliwość obrotów ślimaka ograniczającą zużycie układu uplastyczniającego.

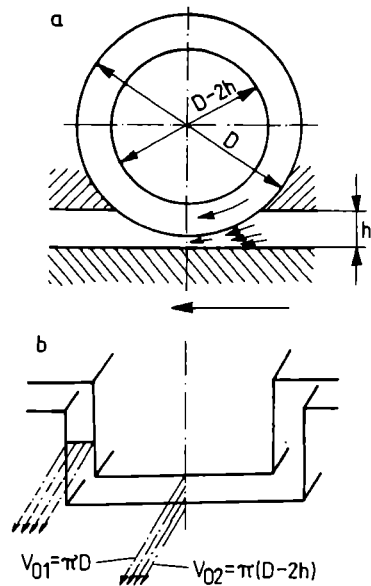
Dwuślimakowe układy przeciwbieżne tworzą, pomijając luzy międzyzwojowe, wzdłużnie i poprzecznie zamknięte odcinki kanałów ślimaków — komory. Zapewniają one wymuszone transportowanie tworzywa, ale są także przyczyną małej efektywności jego mieszania wzdłużnego. Poprawę tej efektywności można uzyskać dzięki zastosowaniu odpowiednich rozwiązań konstrukcyjnych stref ślimaków (rys. 1) — zwłaszcza strefy sprężania lub dozowania — takich, jak np. dobór właściwych wartości luzów międzyzwojowych w poszczególnych strefach ślimaków. Wartość luzów (szczelin) międzyzwojowych (rys. 2) wywiera zasadniczy wpływ na



Rys. 2. Elementy geometryczne zazębienia ślimaków w przekroju osiowym: 1 — ślimak prawozwojowy, 2 — ślimak lewozwojowy, $S_{b \min}$ — luz boczny minimalny, $S_{b \max}$ — luz boczny maksymalny, S_w — luz czołowy (walcowy), e — szerokość grzbietu zwoju, b — szerokość kanału, β — kąt pochylenia płaszczyzny bocznej zwoju

Fig. 2. Axial cross-section of geometrical intermeshing elements: 1 — right screw, 2 — left screw; $S_{b \min}$ — side inter-screw gap (minimal), $S_{b \max}$ — side inter-screw gap (maximal), S_w — calender gap, e — screw crest width, b — channel width, β — flight flank inclination angle

przebieg procesu uplastyczniania PVC. Przepływy w szczelinach przeciwdziałają przepływowi tworzywa transportowanego w komorach, a jednocześnie umożliwiają wymianę tworzywa między komorami, polepszając tym samym jego ujednorodnienie. Sprawność transportowania tworzywa, jego wymieszanie i czas przebywania w układzie uplastyczniającym oraz stabilność procesu w znacznej mierze zależą od wartości luzów międzyzwojowych ślimaków, tzn. od intensywności ruchów tworzywa w szczelinach bocznych i czołowych ślimaków (rys. 3).



Rys. 3. Ruch tworzywa w wyizolowanej szczelinie międzyzwojowej: (a) przekrój poprzeczny ślimaków; (b) przekrój wzdłużny przez zazębienie zwojów; D — średnica zewnętrzna ślimaka; h — głębokość kanału ślimaka; V_{01} i V_{02} — odpowiednio prędkość obwodowa na średnicy zewnętrznej ślimaka oraz na rdzeniu ślimaka (założono prędkość kątową ślimaków $\omega = 1$)

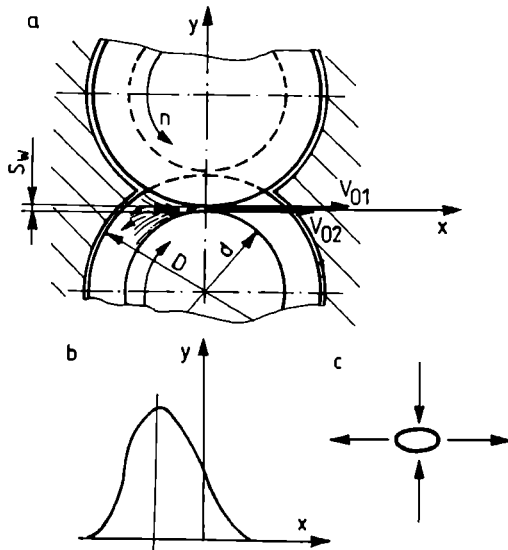
Fig. 3. Mass transport in the isolated intermeshing gap: (a) screw cross-section; (b) longitudinal section of the intermeshing flight; D — external screw diameter; h — screw channel depth; V_{01} , V_{02} — circumferential speed on the screw outer diameter and screw core, respectively (assumed angular velocity $\omega = 1$)

W obszarze zazębienia ślimaków można wyróżnić następujące rodzaje przepływów uplastycznionego tworzywa [4, 5, 13]: międzyślimakowy, międzyzwojowy (dzielony na przepływ w szczelinie bocznej i czołowej, czyli walcowej) oraz przepływ przeciekowy.

Analiza prędkości odkształcenia tworzywa w dwuślimakowych przeciwbieżnych układach uplastyczniających wskazuje, że największe jej wartości występują w czołowych szczelinach międzyzwojowych zazębienia ślimaków (rys. 4). Jednym z najważniejszych względnych mierników efektywności uplastyczniania, w tym także ujednorodniania, jest praca wymagana do odkształcenia tworzywa podczas wytłaczania. Miarę wykonywanej pracy stanowi prędkość odkształcenia tworzywa, charakteryzowana gradientem poprzecznym prędkości dv_x/dy występującym w szczelinie czołowej zazębienia ślimaków. Przybliżone wartości takiego gradientu w dwuślimakowych układach przeciwbieżnych można obliczyć z następującej zależności:

$$dv_x/dy = (V_{01} - V_{02})/S_w \quad (1)$$

gdzie: V_{01} i V_{02} — odpowiednio prędkość obwodowa na średnicy zewnętrznej ślimaka oraz na rdzeniu ślimaka (rys. 3); S_w — czołowy luz międzyzwojowy.



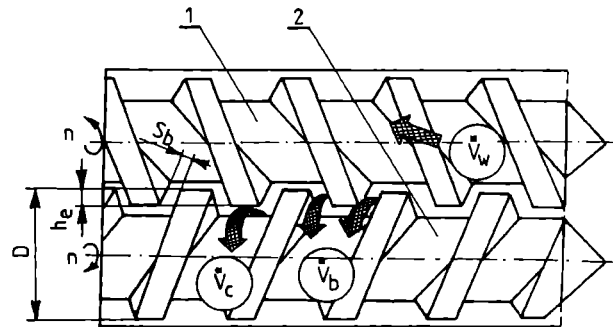
Rys. 4. Analiza przepływu międzyzwojowego tworzywa w szczelinie czołowej: a) ruch tworzywa w wyizolowanej międzyzwojowej szczelinie walcowej; V_{01} i V_{02} — odpowiednio prędkość obwodowa na średnicy zewnętrznej ślimaka oraz na rdzeniu ślimaka; S_w — luz czołowy; b) rozkład ciśnienia (p); c) schematyczne przedstawienie kierunków działania sił na cząstkę znajdującą się w obszarze największego ciśnienia tworzywa

Fig. 4. Analysis of intermeshing flow in the calender gap: a) mass transport in the isolated intermeshing gap; V_{01} , V_{02} — circumferential speed on the screw outer diameter and screw core, respectively; S_w — calender gap; b) pressure (p) distribution; c) schematic presentation of forces acting on a particle within the highest polymer pressure area

W analizie przebiegu procesu uplastyczniania dwuślimakowego pomija się zarówno przepływy międzyślimakowe, jak i przeciekowe ze względu na ich stosunkowo małą wartość w porównaniu z wartościami przepływów międzyzwojowych. Poza tym podczas przepływów międzyzwojowych, zwłaszcza walcowych (rys. 4) zachodzi jednocześnie, oprócz procesu mieszania rozprzeczającego, intensywny proces mieszania ściągającego, w tym także proces ugniatania oraz rozcierania uplastycznionego tworzywa. Ocena wpływu zarówno elementów geometrycznych ślimaków, zwłaszcza wymiarów szczelin międzyzwojowych (wysokości i szerokości szczeliny), jak i szybkości obrotowej ślimaków (n) oraz lepkości tworzywa (η) nastęrcza pewne trudności. Przepływy przez szczeliny boczne (tj. występujące po obu stronach zwoju) łączą się równoległe z przepływem przez szczelinę walcową (rys. 5) i są wywołane tym samym spadkiem ciśnienia, dlatego więc są ściśle współzależne.

Wykonanie w procesie technologicznym ślimaków o wymaganych luzach czołowych nie napotyka na istotne trudności — zewnętrzna powierzchnia grzbietów zwojów jest szlifowana, a uzyskanie odpowiedniego kształtu den kanałów jest proste; dlatego też w dalszych

rozważaniach zanalizujemy wyłącznie przepływ przez szczeliny boczne ślimaków.



Rys. 5. Schemat uplastyczniającego dwuślimakowego układu przeciwbieżnego z zaznaczeniem ważniejszych rodzajów przepływu: 1 — ślimak prawozwojowy, 2 — ślimak lewozwojowy, D — średnica zewnętrzna ślimaka, h_e — wysokość zazębienia się ślimaków, n — szybkość obrotowa ślimaków, S_b — luz boczny, \dot{V}_b — natężenie przepływu w szczelinach bocznych, \dot{V}_c — natężenie przepływu w szczelinie czołowej, \dot{V}_w — natężenie przepływu przeciekowego

Fig. 5. Fragment of the counter-rotating twin-screw plasticizing system showing the most important flow types: 1 — right screw, 2 — left screw, D — screw outer diameter, h_e — intermeshing height of screws, n — screw rotating speed, S_b — side inter-screw gap, \dot{V}_b — side gap flow rate, \dot{V}_c — calender gap flow rate, \dot{V}_w — leakage flow rate

W przypadku ślimaków walcowych, objętościowe natężenie przepływu tworzywa przez szczelinę boczną (\dot{V}_b), będące sumą przepływów wstecznych (włeczonego i ciśnieniowego) można wyznaczyć z uproszczonej zależności (model jednowymiarowy) [14]:

$$\dot{V}_b = 2h_e \left[-\frac{1}{12\eta_b} \Delta p_b S_b^3 - \frac{\pi D n}{\cos \phi} S_b \right] \quad (2)$$

gdzie: S_b — luzy boczne, h_e — wysokość zazębienia się ślimaków, ϕ — kąt pochylenia (kąt wzniosu) linii śrubowej zwojów, n — szybkość obrotowa ślimaków, D — średnica ślimaka, Δp_b — spadek ciśnienia przepływu przez szczeliny boczne.

Jak wynika z zależności (2), zwiększenie h_e , Δp_b , S_b , D oraz n wywołuje znaczny wzrost natężenia przepływu tworzywa. Zbyt duże wartości \dot{V}_b (tj. przepływu wstecznego) mogą być przyczyną wypływu tworzywa przez otwory odgazowania, a ciepło generowane wskutek tarcia może powodować miejscowy rozkład cieplny tworzywa. Oba te zjawiska, występujące oddzielnie lub równocześnie, uniemożliwiają właściwy przebieg procesu wytłaczania.

ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE WSPÓŁDZIAŁANIA ŚLIMAKÓW

Wykonanie układu uplastyczniającego, zwłaszcza stożkowego, nastęrcza wiele trudności. Jedną z kompli-

kacji stanowi uzyskanie odpowiednich wartości luzów międzyzwojowych bocznych, w tym luzów o wartości stałej wzdłuż wysokości ząbienia się ślimaków h_e w strefie dozowania. Wartości luzów międzyzwojowych (bocznych i czołowych) w strefie dozowania powinny być stosunkowo małe (<1 mm) ze względu na konieczność występowania w tej strefie odpowiednio wysokiego ciśnienia potrzebnego do pokonania oporów przepływu w kanałach głowicy. Powyższe założenie dotyczy zwłaszcza układów uplastyczniających stożkowych o dużym natężeniu przepływu tworzywa, gdzie końcowa część stref dozowania charakteryzuje się uzwojeniem o znacznej stromości pochylenia linii śrubowej zwojów.

Ślimaki wytłaczarek dwuślimakowych poddaje się w ogół obróbce metodą frezowania za pomocą freza palcowego (trzępieniowo-stożkowego) o prostoliniowej powierzchni działania, rzadziej za pomocą freza krążkowego. Oś freza palcowego jest prostopadła do powierzchni dna kanału i przesunięta względem osi ślimaka o wartość ∇_y . Wymaganą wartość przesunięcia ∇_y freza w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie [15, 16] uzyskuje się za pomocą programu obliczeniowego uwzględniającego uzyskanie minimalnego odchylenia krzywizny zarysu osiowego zwoju ślimaka od linii prostej przechodzącej przez skrajne punkty zarysu. Określa się je na podstawie wartości elementów geometrycznych charakteryzujących zarówno profil uzwojenia ślimaka, jak i profil freza (rys. 6). Maksymalne odchyłki krzywizny zarysu osiowego zwoju ślimaka od linii prostej

w przypadku obliczonego teoretycznie optymalnego przesunięcia freza ∇_y są wyraźnie mniejsze od wartości 0,1 mm [15, 17].

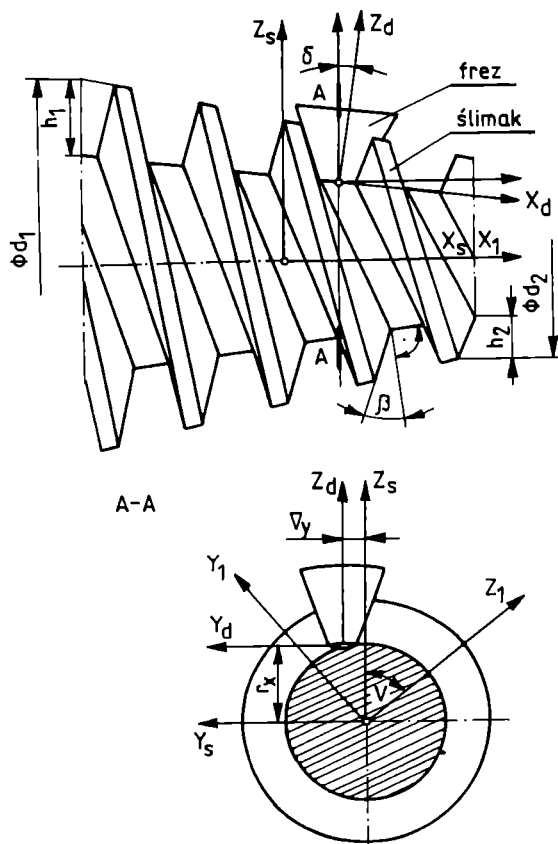
Rozkład wartości bocznych luzów międzyzwojowych wzdłuż strefy ślimaków w istotny sposób zależy m.in. od zmiany kąta pochylenia powierzchni bocznej zwoju (β) (zwanego również kątem pochylenia zarysu osiowego zwoju) (rys. 6). Wartość kąta β (pomijając odchylenia zarysu osiowego od linii prostej) zależy od elementów geometrycznych ślimaka i freza oraz od ∇_y . Wartość tę można wyznaczyć z zależności [9]:

$$\beta = \arctg \left[\frac{\operatorname{tg} \gamma}{\cos \phi_z} + \frac{2\nabla_y}{\pi D(D-2h)} - \frac{2d_f \sin \frac{\phi_z + \phi_w}{2} \sin \frac{\phi_w - \phi_z}{2}}{h \cos \phi_z \cos \phi_w} \right] \quad (3)$$

gdzie: D — średnica zewnętrzna ślimaka, h — głębokość kanału ślimaka, d_f — średnica minimalna freza palcowego, γ — kąt zarysu osiowego stożkowej powierzchni działania freza, ∇_y — przesunięcie osi freza względem osi ślimaka, ϕ_z — kąt pochylenia linii śrubowej zwoju na średnicy zewnętrznej, ϕ_w — kąt pochylenia linii śrubowej zwoju na średnicy rdzenia.

Znaczny dodatni wpływ na wartość kąta β wywiera kąt γ , zwłaszcza w razie występowania dużych kątów ϕ_z . Dodatni, ale mniej wyraźny wpływ ma ∇_y ze względu na nieznaczne jego wartości (<4 mm). Wzrost średnicy freza (d_f) z równoczesnym zmniejszaniem głębokości kanału ślimaka (h) powoduje zmniejszenie wartości kąta β .

Z analizy równania (3) wynika, że kąt β pochylenia powierzchni bocznej zwoju nie zmienia się wzdłuż strefy ślimaka, gdy średnica, wartości kątów ϕ_z i ϕ_w oraz głębokość kanału są stałe. Powyższy warunek spełniają ślimaki walcowe ze stałym skokiem linii śrubowej zwoju lub zwojów. W przypadku ślimaków stożkowych za-

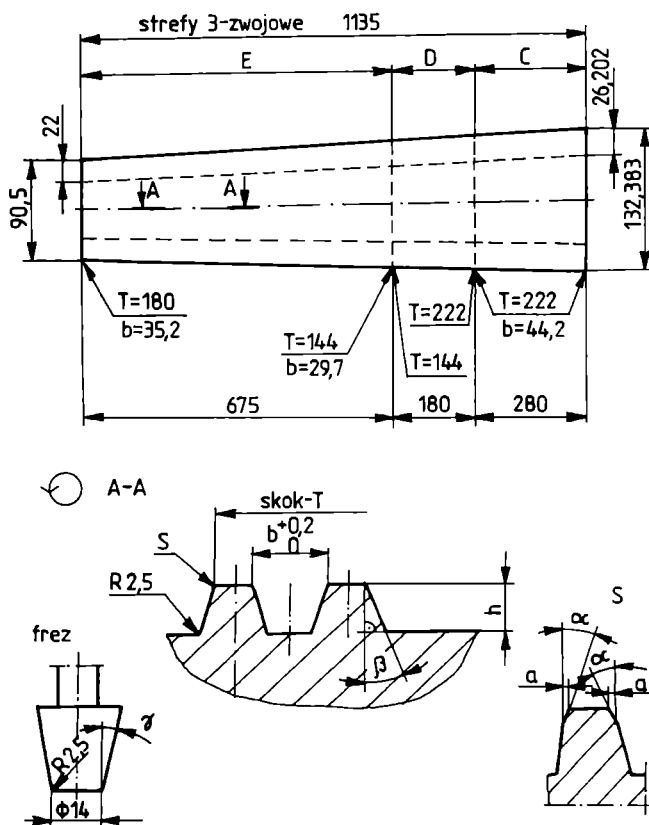


Rys. 6. Schemat względnego ustawienia ślimaka i freza w procesie obróbki. Oznaczenia układów odniesienia [17]: X_s, Y_s, Z_s — układ ślimaka; X_d, Y_d, Z_d — układ działania freza; X_1, Y_1, Z_1 — układ współrzędnych zarysu osiowego ślimaka; d_1, d_2 — odpowiednio średnica ślimaka na początku i końcu strefy; h_1, h_2 — odpowiednio wysokość zarysu osiowego ślimaka na początku i końcu strefy; β — kąt zarysu osiowego ślimaka; δ — kąt ustawienia osi freza (prostopadle do dna wrębu zwojów ślimaka); r_x — przesunięcie pionowe freza; ∇_y — przesunięcie poziome freza

Fig. 6. Scheme of relative positioning of the screw and mill during machining. Reference coordinates [17]: X_s, Y_s, Z_s — crew coordinates; X_d, Y_d, Z_d — mill cutting coordinates; X_1, Y_1, Z_1 — coordinates of the axial screw profile; d_1, d_2 — screw diameters at beginning and end of the zone, respectively; h_1, h_2 — axial screw profiles at beginning and end of the zone, respectively; β — axial screw profile angle; δ — mill cutter setup angle (perpendicular to notch bottom); r_x — vertical mill shift; ∇_y — horizontal mill shift

równy o stałej, jak i zmiennej głębokości kanałów w praktycznych rozwiązaniach konstrukcyjnych kąt β ulega zmianie wzdłuż strefy ślimaka; np. gdy skok T (wynikający z kątów ϕ_z i ϕ_w) ma stałą wartość, to kąt β wyraźnie maleje wzdłuż strefy ślimaka ze względu na wzrost kąta pochylecia linii śrubowej zwoju.

Jeżeli podczas konstruowania ślimaków występują zmiany kąta β wzdłuż strefy, to aby utrzymać stałą wartość bocznych luzów międzyzwojowych zazębiających się ślimaków należy odpowiednio zmienić szerokość kanałów (b) wzdłuż strefy ślimaka. Wraz ze wzrastającym skokiem linii śrubowej zwoju (T) oraz malejącą głębokością (h) kanału ślimaka stożkowego wyraźnie zmieniają się wartości kąta β ; koryguje się je zmianą wartości b wzdłuż strefy w celu utrzymania stałego bocznego luzu międzyzwojowego (strefa E ślimaka, rys. 7).



Rys. 7. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego segmentu ślimaka stożkowego oraz zarys osiowy freza palcowego; strefy ślimaka: C — odgazowania, D — przejściowa, E — dozowania; a i α — wielkości charakteryzujące sfrezowanie zwoju

Fig. 7. Example of construction solution of the conical screw segment and axial profile of the slotting mill; screw zones: C — degassing, D — transient, E — feeding, a and α — parameters characterizing flight milling

Ponadto w procesie projektowania ślimaków dwuślimakowych wylączarek przeciwbieżnych należy uwzględnić wymagania wytrzymałościowe elementów

geometrycznych ślimaków, głównie szerokości grzbietu zwoju ($e_{min.} = 5$ mm), a także możliwości wykonawcze, gdy dobiera się wartość średnicy freza ($d_{min.} = 6$ mm).

ANALIZA ZARYSU OSIOWEGO ŚLIMAKÓW STOŻKOWYCH PODDAWANYCH OBRÓBKĘ STOŻKOWYM FREZEM PALCOWYM

Istnieje obszerna literatura dotycząca obróbki ślimaków walcowych stosowanych w przekładniach ślimakowych [17], natomiast inne rodzaje ślimaków (np. ślimaki globoidalne lub ślimaki stosowane w wylączarkach do przetwórstwa tworzyw, zwłaszcza w dwuślimakowych wylączarkach przeciwbieżnych) są rozpatrywane raczej sporadycznie. W praktyce właśnie te pozostałe rodzaje ślimaków znajdują dość szerokie zastosowanie, a ich technologia jest skomplikowana.

We współczesnych stożkowych dwuślimakowych wylączarkach przeciwbieżnych wykorzystuje się również tzw. ślimaki o podwójnym stożku [18], gdzie stożek wierzchołków i stożek den kanałów (den wrębów zwojów) ślimaka mają różną zbieżność. Ponadto zmienia się w nich na długości ślimaka wysokość zarysu zwojów (głębokość kanałów ślimaka), a w efekcie — zarys ślimaka (kąt i przebieg zarysu osiowego ślimaka). Precyzyjne wykonanie ślimaka wymaga w procesie obróbki zmiany w sposób ciągły względnego ustawienia ślimaka i freza (odległości freza od osi ślimaka). Zatem tego typu ślimaki powinny być wykonywane za pomocą obrabiarek sterowanych numerycznie [15, 16]. Odpowiednie sterowanie obrabiarki należy uprzednio opracować na podstawie analizy zależności zmienności zarysu osiowego ślimaka od elementów geometrycznych narzędzia oraz od parametrów względnego ustawienia freza i ślimaka w procesie obróbki.

Ustawienie freza i kinematyka obróbki ślimaka

W procesie obróbki ślimaka stożkowego sterowanym numerycznie frezem palcowym o zarysie prostoliniowym w przekroju osiowym powierzchni działania, oś freza ustawiona jest prostopadle do tworzącej stożka den wrębów zwojów ślimaka i w określonej odległości od jego osi. Odległość osi freza i osi ślimaka (rys. 6) można rozłożyć na dwie składowe:

- przesunięcie pionowe (r_x) polegające na odsunięciu freza od osi ślimaka w kierunku promieniowym w celu ustawienia freza we wrębie zwojów ślimaka,
- przesunięcie poziome (∇_y) polegające na zsunieniu freza z płaszczyzny osiowej w kierunku prostopadłym do osi freza i osi ślimaka o określoną wartość.

W przypadku niezerowej wartości ∇_y wartość r_x musi być tak skorygowana, aby uzyskać w danym przekroju poprzecznym ślimaka żądany promień dna wrębu jego zwojów. Korygowanie r_x odbywa się w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny osiowej ślimaka i odległej od niej o wartość przesunięcia poziomego. Przesunięcie

pionowe jest różne na długości ślimaka także w przypadku obróbki ślimaków stożkowych. Ustawienie freza i ślimaka zależy zatem od ich względnego wzajemnego położenia, czyli musi zawierać parametr kinematyki względnego ruchu ślimaka i freza w procesie obróbki.

Poza tym należy uwzględnić prostopadle ustawienie osi freza do dna wrębu zwojów ślimaka pod kątem δ (półką stożka dna wrębów zwojów ślimaka).

Układ równań opisujący zarys osiowy ślimaka — zawierający równanie wektorowe tworzącej narzędzia w układzie ślimaka oraz równania opisujące warunki obwiedni [17] — można zapisać w postaci ogólnej:

$$\bar{r}_s = \bar{r}_s(u, \phi, \nu) \quad (4)$$

$$f_1(u, \phi, \nu) = 0 \quad (5)$$

$$f_2(u, \phi, \nu) = 0 \quad (6)$$

gdzie: u — parametr położenia punktu na prostej tworzącej zarysu osiowego freza, ϕ — parametr powierzchni działania narzędzia, ν — parametr rodziny powierzchni działania freza w układzie ślimaka.

W odniesieniu do zadanej wartości parametru u , z układu równań (5) i (6) należy wyznaczyć odpowiadające mu wartości parametrów ϕ i ν , by po podstawieniu wartości tych trzech parametrów do równania wektorowego (4) otrzymać współrzędne punktu zarysu osiowego ślimaka. Cykl obliczeń powtarza się, kolejno zmieniając wartości parametru u . Zadając wartości tego parametru w granicach od zera do górnej wartości granicznej (liczbę punktów zarysu można zadawać w programie) wyznacza się kolejne punkty zarysu osiowego ślimaka. Kąt zarysu osiowego ślimaka określa się w odniesieniu do prostej poprowadzonej przez skrajne punkty zarysu osiowego (wyznaczające położenie dna kanału i grzbietu zwoju ślimaka).

Liczby zwojów ślimaka nie wykorzystuje się w programie obliczeń, a szerokość wrębu na średnicy zewnętrznej ślimaka (jako wielkość pomocnicza) służy do obliczenia wysokości zarysu zwojów ślimaka. Szerokość wrębu określa się równoległe do osi ślimaka.

Użytkownik programu sterującego obrabiarki zmienia dane liczbowe, uwzględniając elementy geometryczne poddawanego obróbce ślimaka i użytego freza.

Jako wyniki obliczeń otrzymuje się wartości kąta zarysu osiowego ślimaka (β) i przesunięcia pionowego freza (r_x) oraz odchylenia zarysu osiowego ślimaka od prostej łączącej skrajne punkty zarysu.

W procesie obliczeń różnych wartości liczbowych ∇_y , dzięki zastosowaniu programu komputerowego, uzyskuje się możliwość określenia korzystnych wartości r_x i ∇_y , którym odpowiadają najmniejsze odchylenia zarysu osiowego ślimaka od prostej.

Wyniki obliczeń

Badaniom zarysu osiowego ślimaka poddano odcinek ślimaka stożkowego zastosowanego w zmodyfikowanej

wytłaczarce dwuślimakowej 2T17/9M (opracowanej w IPTS Metalchem Toruń, wykonanej w ZMCH Metalchem Gliwice). Na rysunku 7 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne odcinka ślimaka o uzwojeniu ciągłym, które składa się z trzech stref trójzwojowych (C, F i D).

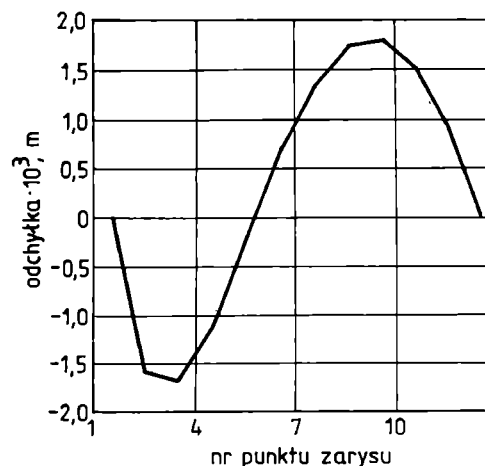
Zawarte w tabeli 1 wartości β i r_x potwierdzają zmienność przebiegu zarysu i kąta zarysu w różnych przekrojach wzdłuż osi ślimaka.

T a b e l a 1. Przykład wyników obliczeń kąta zarysu osiowego ślimaka (β) i przesunięcia pionowego freza (r_x) z uwzględnieniem korzystnych wartości ∇_y , dotyczący stożkowego ślimaka w zmodyfikowanej wytłaczarce dwuślimakowej

T a b l e 1. Example calculations of axial screw profile angle (β) and vertical mill shift (r_x) with consideration of advantageous ∇_y values of a conical screw in a modified twin-screw extruder

Strefa		∇_y , mm	β	r_x , mm
odgazowania (C)	zarys lewy	2,125	9°57'26"	33,151
początek	zarys prawy	-2,103	9°57'22"	33,156
dozowania (E)	zarys lewy	3,500	9°58'53"	23,170
koniec	zarys prawy	-3,517	9°58'58"	23,170

Jak wynika z obliczeń, istnieje ściśle określona wartość przesunięcia poziomego freza ∇_y odpowiadająca minimalnym wartościom odchyłek (odchyleń) zarysu wrębu ślimaka od prostej; np. w omawianym przypadku nie przekraczają one wartości 0,003 mm (rys. 8), natomiast w przypadku wartości niekorzystnej, np. $\nabla_y = 0$, odchyłki zarysu przekraczają 0,3 mm. Prawy (naporowy) i lewy bok zarysu wrębu zwojów ślimaka powinny być poddawane obróbce oddzielnie, z położeniem freza po przeciwnych stronach płaszczyzny osiowej ślimaka.

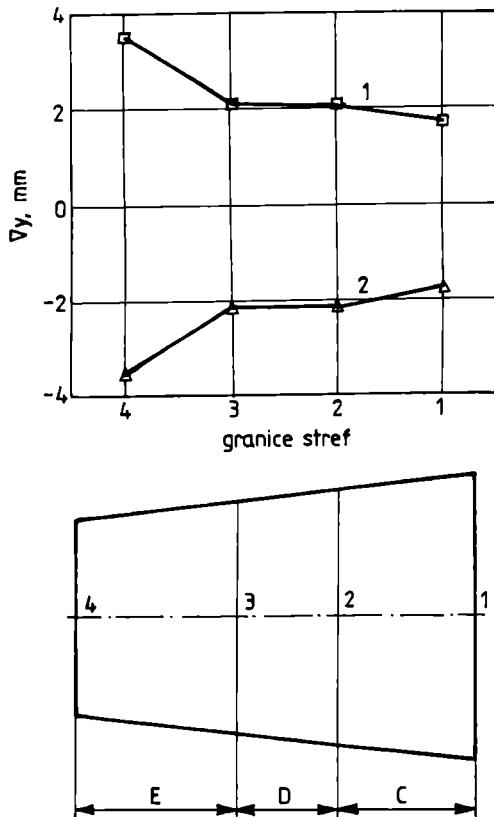


Rys. 8. Wartości odchyłek zarysu osiowego ślimaka stożkowego na końcu strefy E po lewej stronie boku zarysu ($\nabla_y = 3,500$), tj. po stronie naporowej zwoju

Fig. 8. Deviations of conical screw axial profile at end of zone E on left flank ($\nabla_y = 3,500$), i.e. on the flight thrust side

Jednak największy wpływ na kąt zarysu i sam zarys ma przesunięcie poziome ∇_y (parametr ustawiany na obrabiarku). Jeżeli odchyłki mają być minimalne na całej długości ślimaka, to należy w sposób ciągły zmieniać parametry ∇_y i r_x w procesie obróbki. Zatem dokładna obróbka ślimaków stożkowych jest możliwa tylko za pomocą obrabiarek sterowanych numerycznie.

W zakresie poszczególnych stref przesunięcie poziomu freza zmienia się w sposób liniowy, jednak jak to wynika z rys. 9, szybkość tych zmian jest różna wzdłuż poszczególnych stref ślimaka.



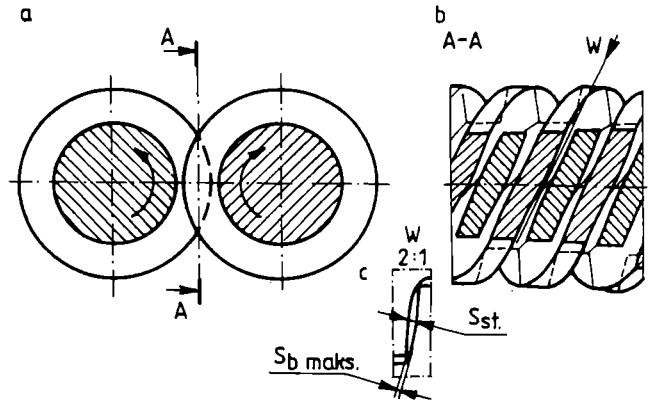
Rys. 9. Korzystne poziome przesunięcie freza (∇_y) w poszczególnych strefach segmentu ślimaka; 1 — lewy bok zarysu, 2 — prawy bok zarysu

Fig. 9. Advantageous horizontal mill shift (∇_y) for individual screw zones; 1 — left outline, 2 — right outline

Praktyczne wykonanie segmentu ślimaka

Segment ślimaka zawierający strefy C (odgazowania), D (przejściową) i E (dozowania) został wykonany za pomocą obrabiarki firmy Waldrich (Coburg, Niemcy) za pomocą freza palcowego o minimalnej średnicy $d_{f \min.} = 14 \text{ mm}$ ($\gamma = 10^\circ$); jego przesunięcie ∇_y po stronie naporu zwoju wynosiło $-3,526$, natomiast po stronie przeciwnej zwoju $3,565$. Stała wartość przesunięcia ∇_y na długości poszczególnych stref segmentu ślimaka wynika z ograniczeń technologicznych obrabiarki. Próba całko-

witego zazębienia segmentów ślimaka (bez zukosowania krawędzi zwojów) była niemożliwa w końcowym odcinku strefy E, gdzie krawędzie naporowe grzbietów zwojów jednego ślimaka dotykały powierzchni bocznych zwojów drugiego ślimaka (brak luzu bocznego, luz czołowy wynosił ok. 4 mm). Na rys. 10 przedstawiono kształt szczeliny między zazębiającymi się ślimakami

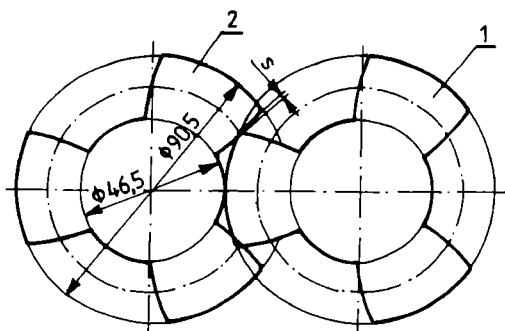


Rys. 10. Fragment usytuowania wzajemnego ślimaków stożkowych w strefie dozowania E: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój wzdłużny w obszarze zazębienia, c) szczelina między zazębiającymi się ślimakami w kierunku pochylenia linii śrubowej (odległości minimalne między bokami zwojów współpracujących ślimaków); S_{st} — luz międzyzwojowy na średnicy podziałowej

Fig. 10. Fragment of the placing of conical screws in the feeding zone E: a) cross section, b) longitudinal section, c) longitudinal intermeshing gap towards screw helix inclination (minimal distances between interacting screw flights); S_{st} — flight gap on intermesh diameter

w kierunku wzniosu linii śrubowej zwoju. Powstałe między płaszczyznami bocznymi zwojów współpracujących ślimaków odległości minimalne są różne wzdłuż wysokości zazębienia się ślimaków. Na średnicy stożka podziałowego zazębiających się ślimaków, gdzie kąty pochylenia linii śrubowych zwoi obu ślimaków są jednakowe ($\phi_{1st} = \phi_{2st} = \text{ok. } 39^\circ$), luz boczny jest maksymalny — wynosi $S_{st} = \text{ok. } 1,9 \text{ mm}$, i jest równy wartości projektowanej. Natomiast na średnicy zewnętrznej stożka od strony naporowej przy krawędzi grzbietu zwoju luz boczny minimalny wynosi $S_{b \min.} = 0$ ($\phi_z = \text{ok. } 32^\circ$), a luz boczny maksymalny $S_{b \max.} = 0,9 \text{ mm}$ ($\phi_w = \text{ok. } 51^\circ$). Odpowiednie zukosowanie krawędzi grzbietów zwojów ($a \times \alpha$, rys. 7) w końcowym odcinku strefy E wyeliminowało powstały mankament, dając minimalny luz przekraczający $0,6 \text{ mm}$.

Uwzględniając napotkane problemy w uzyskaniu odpowiednich luzów bocznych (o wartości stałej wzdłuż wysokości zazębienia się ślimaków h_z) w płaszczyźnie prostopadłej do linii pochylenia zwoju na średnicy podziałowej stożka ślimaków, wykonano wstępną



Rys. 11. Zarys czołowy zazębiających się ślimaków stożkowych na końcu strefy E segmentu ślimaka (wg rys. 7): 1 — ślimak prawozwojowy, 2 — ślimak lewozwojowy, S — luz boczny w przekroju czołowym

Fig. 11. Frontal profile of the intermeshing conical screws at end of zone E of the screw segment: 1 — right screw, 2 — left screw, S — lateral gap in front cross-section

analizę przebiegu zarysu czołowego zazębiających się ślimaków [19]. Rysunek 11 przedstawia zarys czołowy zazębiających się ślimaków na końcu strefy E (z założeniem $S_w = 0$); wynika z niego, że na średnicy zewnętrznej stożka brak jest luzu (luz ma wartość ujemną wynoszącą $-3,1$ mm), natomiast na średnicy podziałowej już ma wartość dodatnią ($1,3$ mm). Analiza zarysów czołowych zazębiających się ślimaków w pozostałych strefach (C i D) segmentu potwierdza uzyskane wyniki pomiarów dotyczące braku stałości wartości luzów bocznych wzdłuż h_e , gdy założy się prostoliniowy zarys osiowy kanału ślimaka.

PODSUMOWANIE

Jedną z podstawowych czynności w procesie opracowywania projektu koncepcyjnego nowego lub zmodyfikowanego układu uplastyczniającego wylączarki jest dobór luzów międzyzwojowych w poszczególnych strefach ślimaków, z uwzględnieniem możliwości wykonawczych (ograniczenia technologiczne).

Analiza zarysu osiowego ślimaków potwierdza zmienność jego przebiegu w różnych przekrojach wzdłuż osi ślimaka. W badaniach należy uwzględnić automatyczne poszukiwania korzystnej wartości ∇_y przez opracowany program (metodą kolejnych przybliżeń). Wyniki oceny zarysów czołowych zazębiających się ślimaków potwierdzają brak stałości wartości luzów bocznych wzdłuż wysokości zazębienia się ślimaków, jeżeli przyjmuje się, że zarys powierzchni bocznej zwoju ślimaka w przekroju osiowym ma w przybliżeniu kształt prostoliniowy.

Jeżeli podczas konstruowania ślimaków zmienia się kąt β wzdłuż strefy, to w celu utrzymania stałej wartości luzów międzyzwojowych bocznych zazębiających się ślimaków (rys. 2) należy odpowiednio zmienić szerokości kanałów (b) wzdłuż strefy. Poza tym w strefach, gdzie wartości kątów pochylenia linii śrubowej na stoż-

ku podziałowym ϕ_{st} są większe od 35° , a różnica kątów pochylenia ($\phi_w - \phi_z$) $> 15^\circ$, zachodzi konieczność odpowiedniego zukosowania krawędzi zwojów lub zwiększenia luzu bocznego.

Istnieje pilna potrzeba rozwinięcia badań dotyczących współdziałania ślimaków, w tym ślimaków o ewolutowym zarysie czołowym [19]. Luzy między współpracującymi ślimakami są różne w poszczególnych miejscach powierzchni zwojów. Tak więc w przekroju osiowym są większe niż w przekroju czołowym, i kolejno większe niż w płaszczyźnie prostopadłej do linii pochylenia zwoju na średnicy podziałowej stożka ślimaków. Szczelina międzyzwojowa boczna (rys. 10) powinna mieć w przybliżeniu kształt równoległoboku w przypadku ślimaków walcowych, tak jak przedstawia to rys. 2, lub kształt trapezu w przypadku ślimaków stożkowych; wymagana różnica luzów bocznych ($S_{b maks.} - S_{b min.}$) to $0,1-0,3$ mm. Przyjmuje się, że na przepływające przez szczelinę tworzywo wzdłuż jej szerokości (h_e) powinna oddziaływać w przybliżeniu jednokowa szybkość ścinania.

LITERATURA

- Hensen F., Knappe W., Potente H.: „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik, I Grundlagen”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1989, str. 298—316.
- Stasiek J.: *Polimery* 1997, 42, 14.
- „Der Doppelschneckenextruder im Extrusionsprozess”, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1991, str. 73—123.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993, str. 58—69.
- White J. L.: „Twin Screw Extrusion”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork 1990, str. 148—191.
- Pat. polski* 179 289 (1996).
- Stasiek J.: *Plaste Kautsch.* 1994, 36, 392.
- Stasiek J.: *Polimery* 1995, 40, 542.
- Stasiek J.: *Plasty Kaučuk* 1998, 35, 70.
- Rohatyński R.: „Proceedings of International Seminar on Tools and Methods of Concurrent Engineering — TMC 96”, Budapeszt 1996, Materiały, str. 157—175.
- Stasiek J.: *J. Eng. Design* 2000, 11, 133.
- Langhorst H.: „Practical Design of Screws for High-performance Extruders”, Dissertation, RWTH Aachen 1989, str. 51—101.
- Jansen L. P. B. M.: „Twin Screw Extrusion”, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam—Oxford—Nowy Jork 1978.
- Fiedler L., Pipiale A., Marinow S.: *Plaste Kautsch.* 1994, 41, 191.
- Materiały informacyjne firmy Werkzeugmaschinenfabrik Adolf Waldrich Coburg GmbH & Co (Niemcy).
- Informacja firmy Weingärtner Maschinenbau GmbH (Austria) „Schneckenfertigung von der Konstruktion-bis zur Dokumentation”. *Plast. Spec.* 2000, 72, 16, 60.
- Nieszporek T.: *Mechanik* 1999, 72, nr 1.
- Pat. polski* 144 692 (1985).
- Boral P.: „Analiza geometryczna układu dwóch ślimaków stożkowych o stałym i zmiennym skoku stosowanych w wylączarkach dwuślimakowych do transportu tworzywa”, praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2001.