

PIOTR BORAL^{*)}, TADEUSZ NIESZPOREK

Politechnika Częstochowska

Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji

ul. Akademicka 5, Ds-2, 42-201 Częstochowa

Analiza geometryczna układu uplastyczniającego wytłaczarki złożonego z dwóch ślimaków stożkowych

Streszczenie — Stosowane w układach uplastyczniających wytłaczarek ślimaki stożkowe, o zmiennym skoku i zmiennej na długości ślimaka charakterystyce geometrycznej, są często wykonywane z wykorzystaniem metody „prób i błędów”. Przed przystąpieniem do obróbki takich ślimaków konieczna jest zatem analiza geometryczna umożliwiająca ich złożenie w układ uplastyczniający. Opracowano specjalny program komputerowy pozwalający, na podstawie technologii obróbki ślimaków frezem palcowym, określić wartości offsetów Δy frezu, uwzględniające prostoliniowy zarys osiowy boków kanałów ślimaków oraz wyznaczyć luzy międzyzwojowe układu już na etapie projektowania ślimaków. Przedstawiono analizę przykładowego układu uplastyczniającego wykorzystującą opracowaną aplikację do wspomagania projektowania układów dwuślimakowych.

Słowa kluczowe: układ uplastyczniający wytłaczarek dwuślimakowych, ślimak stożkowy, analiza geometryczna.

GEOMETRIC ANALYSIS OF PLASTICIZING SYSTEM IN THE EXTRUDER CONSISTING OF TWO CONE WORMS

Summary – Variable-pitch cone worms, used in the plasticizing systems of extruders, whose geometry varies along the length of the screw, are often made by trial and error. Therefore, the machining of such worms requires subsequent geometric analysis, that makes it possible to assemble them into the plasticizing system. A special software programme was developed, which, on the basis of machining technology for worms using end milling cutter, allows to identify the cutter offsets Δy (taking into account the straight sides of the outline of the axial profiles of worms) and to determine the inter-thread clearance at the stage of designing the worms. An analysis of exemplary plasticizing system using the developed software supporting the design of double worm systems has been presented.

Keywords: twin-screw plasticizing system, cone worm, geometric analysis.

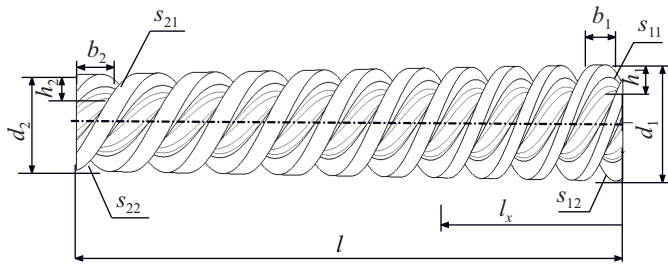
WPROWADZENIE

Ślimaki stożkowe o zmiennym skoku linii śrubowej kanału przepływowego, stosowane w układach uplastyczniających wytłaczarek tworzyw polimerowych, charakteryzują się zmienną charakterystyką geometryczną na długości ślimaka (zmieniają się wielkości, takie jak: średnica zewnętrzna i średnica rdzenia oraz głębokość i szerokość kanału — rys. 1), co powoduje, że ich wykonanie i sprawdzanie dokładności wykonania jest bardzo trudne. Najwydajniejszym układem jest układ złożony z dwóch ślimaków stożkowych przeciwbieżnych, zazębiających się nieszczelnie [1]. Ślimak stożkowy zawiera kilka stref o różnej charakterystyce geometrycznej w zależności od spełnianej funkcji. Każda ze stref, z punktu

widzenia konstrukcji i technologii, może być rozpatrywana oddzielnie [2]. Ślimaki stożkowe to ślimaki wielozwojne, o stałym lub zmiennym skoku linii śrubowej kanału. Cechą charakterystyczną takiego ślimaka jest zmienność wszystkich elementów geometrycznych na jego długości, przy czym dla danego zwoju ślimaka skok na początku i na końcu jest różny (rys. 1), możliwe są także różne skoki dla obu stron tego samego zwoju, co utrudnia wykonanie i kontrolę dokładności tego wykonania. Ślimaki takie są obrabiane frezem palcowym (stożkowym, o osiowym prostoliniowym zarysie jego powierzchni działania) na specjalnej frezarce sterowanej numerycznie [3–7]. Zgodnie z założeniem zarys osiowy ślimaka również ma być prostoliniowy [7–10].

Podstawowym problemem na etapie konstrukcji układu dwuślimakowego jest uzyskanie odpowiednich wartości międzyzwojowego luzu, który powinien być

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: piotrek@itm.pcz.pl



Rys. 1. Strefa dozowania ślimaka stożkowego o zmiennym skoku linii śrubowej kanału i jego charakterystyka: d_1, d_2 — średnice zewnętrzne ($d_1 > d_2$); b_1, b_2 — szerokość kanału na początku i na końcu ślimaka; h_1, h_2 — wysokość kanałów na początku i na końcu ślimaka ($h_1 > h_2$); skoki ślimaka, odpowiednio, na początku dla lewej s_{11} oraz prawej s_{12} strony zarysu, na końcu dla lewej s_{22} oraz prawej s_{21} strony zarysu; l_x — położenie przekroju obliczeniowego; l — długość ślimaka

Fig. 1. The feeding zone of variable-pitch cone worm and its characteristics: d_1, d_2 — outer diameters ($d_1 > d_2$); b_1, b_2 — cut widths at the beginning and at the end of the worm; h_1, h_2 — axial profile heights at the beginning and at the end of the worm ($h_1 > h_2$); worm pitches at the beginning on the left-hand (s_{11}) and right-hand (s_{12}) cut side, at the end on the left-hand (s_{22}) and right-hand (s_{21}) cut side; l_x — position of the examined profile; l — worm length

stały na całej wysokości zazębiających się zwojów, w przekroju osiowym i na całej długości ślimaków.

Ślimak jest obrabiany metodą obwiedniową [11, 12], a zatem zarys obwiedni (zarys osiowy ślimaka) jest różny od zarysu osiowego powierzchni działania narzędzia. Zarys osiowy ślimaka jest zmienny ze względu na zmienność wszystkich elementów geometrycznych ślimaka na jego długości, głównie skoku linii śrubowej kanału, średnicy zewnętrznej i rdzenia. Luz międzyzwojowy natomiast jest określany na kilka sposobów. Pomiar luzu realizowany na specjalnym stanowisku, polega na złożeniu (zamocowaniu ślimaków w kłach) z pary wykonanych ślimaków, układu odpowiadającego układowi takich ślimaków w wyłaczarce. Luz międzyzwojowy (między niepłaskimi powierzchniami ścianek zwojów ślimaków) jest określany też za pomocą szczelinomierza, bądź też na podstawie pomiaru wartości kąta obrotu jednego ze ślimaków przy drugim unieruchomionym. Pierwszy sposób pozwala jedynie w przybliżeniu ocenić równomierność luzu międzyzwojowego na długości ślimaka. Drugi sposób natomiast umożliwia określenie wartości luzu minimalnego (taki luz wystąpi w jednym miejscu na długości ślimaków), a nie rozkładu luzów na długości współpracujących ślimaków.

Określanie luzu międzyzwojowego ślimaków, w przypadku których, metodą prób i błędów, opracowano warunki technologiczne (stały frez, stała specjalizowana obrabiarka, znane ustawienia obrabiarki) procesu ich wykonywania, nie stanowi większego problemu. Gdy jednak dokonuje się próby zmiany lub modyfikacji istniejącej technologii (w wyniku zmiany średnicy narzę-

dzia albo wykorzystania uniwersalnej wielozadaniowej obrabiarki CNC) bądź też, gdy następuje konieczność wykonania nowego ślimaka, wówczas określenie luzu międzyzwojowego metodą prób i błędów jest zbyt kosztowne. Ze względu zaś na fakt wprowadzania do przetwórstwa nowych rodzajów i odmian tworzyw polimerowych, należy się liczyć z koniecznością stosowania ślimaków o odpowiednich, coraz to innych elementach geometrycznych.

Pod uwagę należy też wziąć możliwość obróbki ślimaków stożkowych o zmiennym skoku linii śrubowej kanału, za pomocą zarówno uniwersalnych wielozadaniowych obrabiarek CNC, jak i palcowych frezów walcowych [13].

Do określenia rozmiarów i rozkładu luzów międzyzwojowych, opracowano zatem specjalny program komputerowy opierający się na technologii obróbki ślimaków i pozwalający na określenie luzów międzyzwojowych już na etapie projektowania ślimaków.

WYZNACZANIE LUZU MIĘDYZWOJOWEGO W UKŁADACH DWUŚLIMAKOWYCH

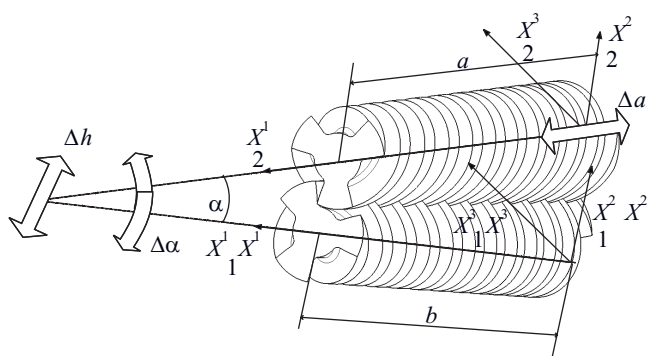
Program do analizy układu dwuślimakowego

W celu analitycznego określenia rozmiarów oraz rozkładu luzów międzyzwojowych ślimaków należy opisać powierzchnie ślimaków współpracujących. Powierzchnia boczna ścianki zwoju śrubowego zależy od elementów geometrycznych narzędzia, jego ustawienia względem obrabianego ślimaka i od kinematyki obróbki. Podczas obróbki ślimaka frezem palcowym o zarysie prostoliniowym w przekroju osiowym powierzchni działania, oś frezu jest ustawiona prostopadle do dna kanałów ślimaka i odsunięta od osi ślimaka o odpowiednią wartość Δy , zmienną wzdłuż osi (długości) ślimaka. Z warunku zapewnienia minimalnej odchyłki zarysu osiowego ślimaka od prostej wyznacza się odpowiednie wartości Δy [11, 14]:

$$\Delta y = f(\gamma_f, d_f, s_{11}, s_{12}, s_{21}, s_{22}, b_1, b_2, l_x, k, h_1, h_2, d_1, d_2, l) \quad (1)$$

gdzie: γ_f — kąt zarysu osiowego frezu; d_f — mała średnica frezu; s_{11}, s_{12}, s_{21} i s_{22} — skoki na lewej i prawej stronie kanału (wrębu), na początku i na końcu ślimaka (strefy); b_1 i b_2 — szerokość kanałów na początku i końcu ślimaka (strefy); l_x — położenie badanego zarysu na długości ślimaka (strefy); k — krotność badanego zarysu; h_1, h_2 — głębokość kanału (wysokości zarysu osiowego), odpowiednio, na początku i na końcu ślimaka (strefy); d_1, d_2 — średnice zewnętrzne na początku i na końcu ślimaka (strefy); l — długość ślimaka (strefy).

Wielkość Δy jest istotna w procesie narządzania obrabiarki do obróbki ślimaka, a także do opisanie powierzchni współpracujących ślimaków [3, 5, 12, 14]. W układzie ślimaków mogą wystąpić błędy montażu, takie jak: Δa — błąd przesunięcia osiowego ślimaka, $\Delta \alpha$ — błąd kąta między osiami współpracujących ślimaków, Δh — błąd odległości między osiami współpracujących ślima-



Rys. 2. Schemat układu dwóch ślimaków stożkowych z błędami montażu: $\Delta\alpha$ – błąd kąta; Δh – błąd odległości między osiami ślimaków; Δa – błąd przesunięcia osiowego ślimaka; X_1, X_2 – układy współrzędnych poszczególnych ślimaków; X – wspólny układ współrzędnych; a, b – długości ślimaków

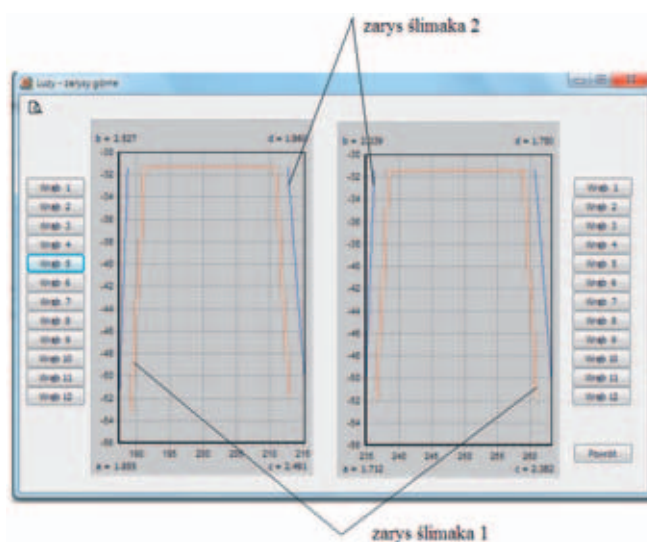
Fig. 2. Schematic diagram of a system of two cone worms with assembly errors: $\Delta\alpha$ – angle error; Δh – error in the distance between worm axes; Δa – worm axial offset error; X_1, X_2 – coordinate systems of individual worms; X – common coordinate system; a, b – worm lengths

ków. W celu określenia luzu międzyzwojowego, powierzchnie boczne zwojów ślimaków współpracujących należy zapisać we wspólnym układzie odniesienia (rys. 2). Założono, że układ odniesienia ślimaków pokrywa się z układem współrzędnych pierwszego ślimaka, a błędy przypisane są do drugiego ślimaka [3].

Do wyznaczenia luzu międzyzwojowego zastosowano metodę przekroju układu ślimaków zbiorem płaszczyzn równoległych do osi ślimaków. W każdej płaszczyźnie przekroju otrzymano zarysy zwojów ślimaka w postaci dyskretnej zbiorów punktów. W dowolnej płaszczyźnie przekroju zarys jednej strony zwoju pierwszego ślimaka i, odpowiadający mu (współpracujący z nim), zarys zwoju drugiego ślimaka, są dwiema krzywymi otrzymywanymi w postaci dyskretnej zbiorów punktów [3, 11]. Krzywe te zastępowano (metodą aproksymacji) zbiorami punktów, rzutowanych na punkty węzłowe (równomiernie rozmieszczone na osi odciętych) siatki rzędnych wprowadzonej w danej płaszczyźnie przekroju [3]. W rezultacie rzędne punktów tak określonych krzywych przekroju zwojów, mogły być ze sobą porównane i na tej podstawie można było wyznaczyć luzy międzyzwojami w danej płaszczyźnie przekroju. Biorąc pod uwagę kolejne płaszczyzny przekroju można było wyznaczyć rozkład luzów w układzie dwóch ślimaków przeciwbieżnych, zazębiających się nieszczelnie.

W rezultacie tych działań opracowano program komputerowy, wspomagający projektowanie układu złożonego z dwóch ślimaków stożkowych obrabianych frezem palcowym stożkowym. Aplikacja przeznaczona do projektowania ślimaków stożkowych o zmiennym skoku składa się z modułów zawierających kolejne etapy analizy układu złożonego z dwóch ślimaków. Moduł pierwszy służy do wyznaczania odpowiednich wartości wielkości Δy frezu, ze względu na prostoliniowy zarys osio-

wy boków wrębów ślimaków, odniesiony do ślimaków prawozwojowego i lewozwojowego. W kolejnym module programu, wykorzystując wyniki pierwszego modułu, wylicza się określony kąt „rozbitcia” kanału frezem w przekroju czołowym (czynnik technologiczny), czyli kąt obrotu narzędzia wokół osi ślimaka, dla zadanej szerokości kanału w przekroju osiowym. Następnie tworzy się układ złożony z dwóch współpracujących ślimaków i wyznacza się przekroje ślimaków wspólną płaszczyzną przekroju oraz luzy międzyzwojowe (rys. 3). Program



Rys. 3. Rozkład luzów w płaszczyźnie osiowej na początku (wręb 2) i na końcu (wręb 12) układu złożonego z dwóch ślimaków stożkowych (wartości elementów geometrycznych ślimaków, jak na rys. 6)

Fig. 3. The distribution of clearances in the axial plane at the beginning (notch 2) and at the end (notch 12) of the system of two cone worms (the values of worm geometric elements as in Figure 6).

komputerowy opracowano w środowisku Windows, w języku Delphi (aplikacja typu RAD – Rapid Application Development), przy czym w programie jest generowany kod w języku AutoLisp dla AutoCada, do wytworzenia dokładniejszego rysunku rozkładu luzów międzyzwojowych [grafika w Delphi z wykorzystaniem komponentu TChart ma charakter jedynie poglądowy (por. rys. 3)].

Analiza układu złożonego z dwóch ślimaków stożkowych

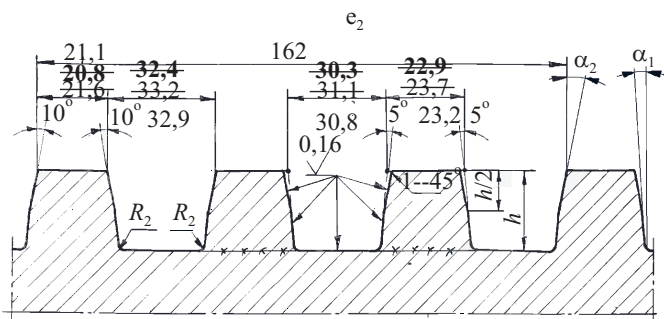
Na podstawie dokumentacji technicznej (rysunków wykonawczych) otrzymanej z zakładu produkcyjnego, przeprowadzono analizę geometryczną układu złożonego z prawo- i lewozwojowego ślimaka stożkowego.

Wielkości rozpatrywanego układu były następujące:

- skok zwoju ślimaka na początku strefy dozowania $s_{11} = 126$ mm;

- skok zwoju ślimaka na końcu strefy dozowania
 $s_{22} = 162$ mm;
- szerokość kanału na początku strefy dozowania
 $b_1 = 26,8$ mm;
- szerokość kanału na końcu strefy dozowania
 $b_2 = 32,4$ mm;
- długość strefy dozowania $l = 520$ mm;
- średnica zewnętrzna ślimaka na początku strefy dozowania $d_1 = 111,53$ mm;
- średnica zewnętrzna ślimaka na końcu strefy dozowania $d_2 = 92,1$ mm;
- głębokość kanału (wysokość zarysu osiowego) na początku strefy dozowania $h_1 = 25,3$ mm;
- głębokość kanału na końcu strefy dozowania $h_2 = 23,05$ mm;
- krotność ślimaka $z = 3$;
- kąt zarysu osiowego ślimaka $\alpha_1 = 5^\circ$;
- średnica frezu stosowanego do obróbki ślimaka $d_f = 14$ mm.

Rozwiązania konstrukcyjne a także zarys (pierwotnie prostoliniowy) w przekroju osiowym kanału przykładowego ślimaka, były wielokrotnie korygowane (rys. 4). Korekty dokonywano po wstępnym wykonaniu ślimaków. Na oddzielnym stanowisku, ślimaki mocowano w kłach specjalnego przyrządu sprawdzającego, w celu złożenia „przekładni” (układu dwóch ślimaków) i sprawdzenia luzów. W przypadku, gdy ślimaki nie zażybiały się, ponownie je obrabiano aby poszerzyć kanał lub zmienić kąt zarysu. Operację taką przeprowadzono nawet kilkakrotnie aż do „zazębienia się” ślimaków. Taka procedura nie daje jednak gwarancji uzyskania właściwego rozkładu luzu międzyzwojowego, a zarazem uniknięcia kosztów wybrakowania ślimaków. Niemożność złożenia „przekładni” z pary ślimaków wynika, m.in. z braku analizy geometrycznej całego układu uplastyczniającego i luzu między zwojami, a także z braku możliwości sprawdzania dokładności wykonania ślimaków już w procesie ich obróbki.



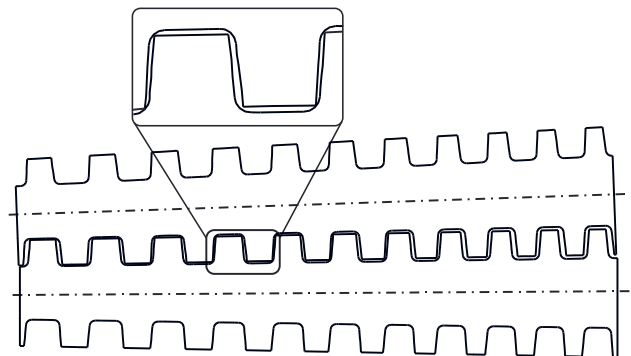
Rys. 4. Fragment przekroju analizowanego ślimaka (kopia oryginalnego rysunku z zakładu produkującego ślimaki, z naniesionymi poprawkami po kolejnych próbach obróbki ślimaka)
 Fig. 4. Part of the section of the analyzed worm (copy of the original drawing from a worm manufacturing plant, with marked improvements after successive trials of worm machining)



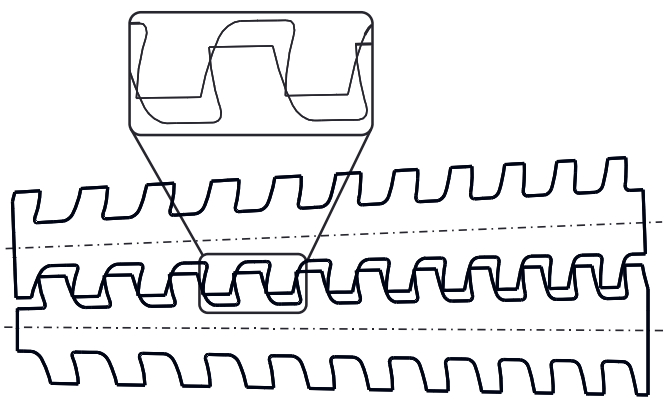
Rys. 5. Dane geometryczne wraz z warunkami technologicznymi względnego ustawienia ślimaków i frezu podczas obróbki, obliczone za pomocą opracowanego programu komputerowego, wspomagającego projektowanie układów dwuślimakowych
 Fig. 5. Geometric data and technological conditions of the relative setting of worms and mill during machining, calculated by the developed software programme supporting the design of double worm systems

Analizę rozpatrywanego układu uplastyczniającego przeprowadzono z wykorzystaniem opracowanego programu komputerowego do wspomagania projektowania technologii układów dwuślimakowych, przy zadanych, wstępnym wartościach elementów geometrycznych (wartości skreślone, por. rys. 4). Obliczono parametry względnego ustawienia ślimaków i frezu w procesie obróbki, zakładając prostoliniowy zarys osiowy boków kanału (rys. 5). Uzyskane w wyniku obliczeń dla tego układu, teoretyczne odchyłki zarysu osiowego od prostej nie przekraczały 0,02 mm.

Ślimaki umieszczone w cylindrze układu uplastyczniającego ustawia się w taki sposób, aby luz promienio-



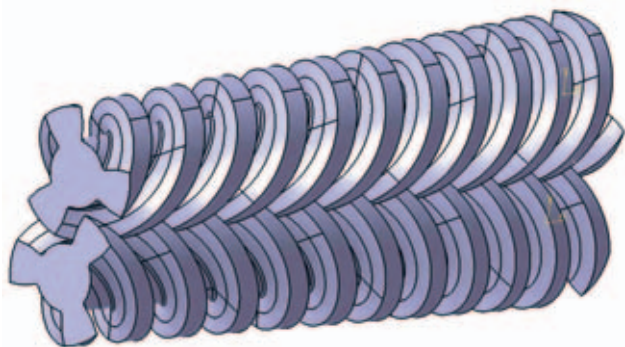
Rys. 6. Przekrój płaszczyną osiową układu składającego się z prawo- i lewoswojowego ślimaka, o danych: $s_{11} = 126$ mm; $s_{22} = 162$ mm; $b_1 = 26,8$ mm; $b_2 = 32,4$ mm; $l = 520$ mm; $d_1 = 111,53$ mm; $d_2 = 92,1$ mm; $h_1 = 25,3$ mm; $h_2 = 23,05$ mm; $z = 3$
 Fig. 6. Axial section of the system composed of right-handed and left-handed worms, with parameters: $s_{11} = 126$ mm; $s_{22} = 162$ mm; $b_1 = 26,8$ mm; $b_2 = 32,4$ mm; $l = 520$ mm; $d_1 = 111,53$ mm; $d_2 = 92,1$ mm; $h_1 = 25,3$ mm; $h_2 = 23,05$ mm; $z = 3$



Rys. 7. Przekrój układu dwóch ślimaków płaszczyzną równoległą do osi ślimaków i odsuniętą od płaszczyzny osiowej o 15 mm – występuje interferencja zarysów ślimaków (wartości elementów geometrycznych ślimaków, jak na rys. 6)

Fig. 7. Section of the double worm system with a plane parallel to the worm axes and shifted by 15 mm from the axial plane – an interference of worm profiles takes place (the values of worm geometric elements as in Figure 6)

wy między nimi i szczelina pomiędzy grzbietami zwojów ślimaków a powierzchnią wewnętrzną cylindra wynosiła, np. 2 mm. Luz międzyzwojowy w przekroju osiowym powinien być stały i równomiernie rozłożony na wysokości zarysu ścianki zwoju i na długości ślimaka. Jak widać na rys. 6, w przekroju osiowym występuje luz (nierównomierny na długości ślimaków) między zwojami współpracujących ślimaków, ale po określeniu zarysów w przekroju płaszczyzną równoległą do osiowej i zsuniętą z niej, np. o 15 mm, luzy przybierają kształt



Rys. 8. Zaprojektowany w systemie Catia model układu składający się z prawo- i lewozwojnego ślimaka, z modyfikacją zarysu osiowego ślimaków: $s_{11} = 126$ mm; $s_{22} = 162$ mm; $b_1 = 27,4$ mm; $b_2 = 33,2$ mm; $l = 520$ mm; $d_1 = 111,53$ mm; $d_2 = 92,1$ mm; $h_1 = 25,3$ mm; $h_2 = 23,05$ mm; $z = 3$, $\alpha_1 = 5^\circ$; $\alpha_2 = 10^\circ$

Fig. 8. Model of the system designed with the use of CATIA software and composed of right-handed and left-handed worms, with modification of the worm axial profile: $s_{11} = 126$ mm; $s_{22} = 162$ mm; $b_1 = 27,4$ mm; $b_2 = 33,2$ mm; $l = 520$ mm; $d_1 = 111,53$ mm; $d_2 = 92,1$ mm; $h_1 = 25,3$ mm; $h_2 = 23,05$ mm; $z = 3$, $\alpha_1 = 5^\circ$; $\alpha_2 = 10^\circ$

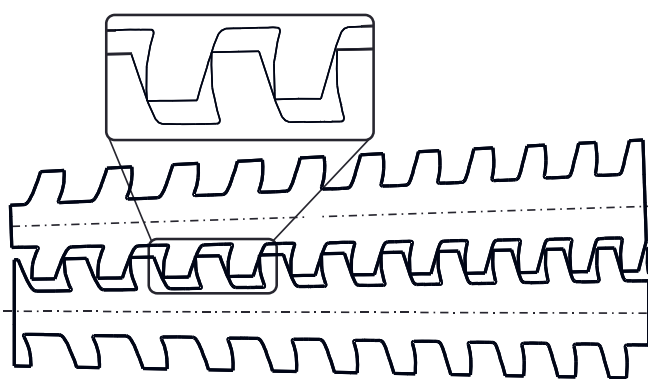
klinów i w niektórych miejscach zarysy przecinają się (rys. 7).

Można zatem stwierdzić, że układ taki nie da się złożyć bez zmiany elementów geometrycznych ślimaków. Dopiero korekta szerokości kanału, fazowanie wierzchołków zarysu lub zmiana kąta zarysu (rys. 4), dają taką możliwość. Należy zwrócić uwagę, że skok linii śrubowej kanału jest zmienny na długości ślimaka – inny jest na początku i inny na końcu ślimaka. Ze zmiennej szerokości kanałów ślimaka wynika również to, że inny jest skok odnoszący się do lewej i prawej strony zarysu tego samego zwoju. Dlatego też przed obróbką ślimaków należy przeprowadzić dokładną analizę całego układu uplastyczniającego wytłaczarki, uwzględniając luzy między zwojami, a nie tylko w przekroju osiowym (stosowane w praktyce sposoby określania luzu międzyzwojowego nie dają takiej możliwości).

Po dokonaniu określonych korekt szerokości kanałów i zmianie kąta zarysu osiowego ślimaka (taka operacja jest stosowana w praktyce) od połowy wysokości zarysu ścianki zwoju ślimaka (rys. 4), układ ślimaków narysowano w programie Catia (rys. 8) a następnie przeprowadzono analizę luzów między zwojami współpracujących ślimaków (rys. 9).

Na jej podstawie można stwierdzić (bez czasochłonnego i kosztownego wykonania ślimaków), że rozpatrywany układ uplastyczniający, po określonych korektach da się złożyć, ale luzy między zwojami nie są równomiernie rozłożone na długości współpracujących ślimaków, co może wynikać ze zmienności skoków ślimaków.

Nie ma prostej zależności między wielkością i rozkładem luzów międzyzwojowych, a elementami geometrycznymi i technologicznymi ślimaków. Nawet właściwy zarys ślimaka, stwierdzony na podstawie pomiaru,



Rys. 9. Przekrój płaszczyzną równoległą do osi ślimaków i odsuniętą od niej o 15 mm, układu składającego się z prawo- i lewozwojnego ślimaka – nie występuje interferencja zarysów ślimaków (wartości elementów geometrycznych ślimaków, jak na rys. 8)

Fig. 9. Section of the system composed of right-handed and left-handed worms with a plane parallel to the worm axes and shifted by 15 mm from the axial plane – no interference of worm profiles takes place (the values of worm geometric elements as in Figure 8)

nie gwarantuje braku interferencji (przecinania się) zarysów ślimaków współpracujących (rys. 7), uniemożliwiającej ich złożenie.

PODSUMOWANIE

Zagadnienia związane z technologią, metrologią i użytkowaniem ślimaków stożkowych o zmiennym skoku, stosowanych w układach uplastyczniających wytłaczarek do tworzyw polimerowych, są bardzo trudne i wciąż jeszcze za mało poznane. Zakłada się, że współpracujące ślimaki przeciwbieżne (zazębiające się nieszczelnie) mają określony i równomiernie rozłożony luz na wysokości zarysu kanału i na długości ślimaka [7]. W konsekwencji ślimaki te są wykonywane za pomocą specjalnych frezarek sterowanych numerycznie, przy użyciu odpowiedniego oprogramowania.

Niewłaściwy dobór wartości wejściowych (początkowych) elementów geometrycznych ślimaka i technologicznych (określających ustawienie narzędzia i obrabianego ślimaka względem siebie podczas obróbki) skutkuje występowaniem zjawiska przecinania się zarysów współpracujących ślimaków, co oznacza, że układ uplastyczniający nie da się złożyć. Wyeliminowanie takich przypadków na etapie projektowania układu ślimaków jest konieczne ze względu na bardzo duży koszt wyprodukowania układu dwóch ślimaków stożkowych przeciwbieżnych zazębiających się nieszczelnie.

Tylko odpowiednia analiza numeryczna rozkładu luzów międzyzwojowych umożliwia właściwą obróbkę ślimaków i zapewnia wymaganą dokładność ich wykonania. Podstawą takiej analizy jest wyznaczenie powierzchni współpracujących ślimaków.

Brak możliwości złożenia układu uplastyczniającego lub niewłaściwy rozkład luzów międzyzwojowych, są efektem głównie nieodpowiedniego projektowania następujących elementów geometrycznych ślimaka: skoku zwoju, kąta zarysu oraz szerokości i wysokości kanałów. Wynika to z faktu, iż w układzie uplastyczniającym współpracują ze sobą średnica zewnętrzna jednego ślimaka i średnica wewnętrzna drugiego ślimaka, a zatem średnice ślimaków o różnych kątach wzniosu linii śrubowej.

Opracowany sposób wyznaczania luzów międzyzwojowych w układzie dwóch ślimaków stożkowych przeciwbieżnych, zazębiających się nieszczelnie, opierający się na wyznaczeniu powierzchni bocznych zwojów współpracujących ślimaków na podstawie ich technologii, pozwala na modyfikację wartości elementów geometrycznych ślimaków, a przede wszystkim, na wyznaczenie parametrów technologicznych (głównie Δy) ślimaków i rozkładu luzów międzyzwojowych. Wynikiem analizy geometrycznej układu dwóch ślimaków zazębiających się nieszczelnie jest więc możliwość zarówno zmiany wartości elementów geometrycznych ślimaków, takich jak: szerokości kanałów i kąt zarysu osiowego śli-

maków, jak i określenie wartości parametrów technologicznych, np. odsunięcia osi frezu od osi ślimaka (zmienne wzdłuż osi ślimaka) w procesie jego obrabiania.

Możliwość weryfikacji elementów geometrycznych ślimaków, a także możliwość opracowania ich technologii i analiza rozkładu luzów międzyzwojowych na etapie projektowania układu uplastyczniającego, pozwalają na wyeliminowanie kosztownej metody prób i błędów, zwłaszcza w przypadku nowych układów ślimaków.

Opracowany przez autorów program komputerowy pozwala także na odejście od tradycyjnej technologii wykonywania omawianych ślimaków na specjalizowanych obrabiarkach na korzyść ich obróbki na coraz powszechniej stosowanych, uniwersalnych wieloosiowych i wielozadaniowych obrabiarkach CNC [11].

LITERATURA

1. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
2. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
3. Boral P.: „Analiza geometryczna układu dwóch ślimaków stożkowych o stałym i zmiennym skoku stosowanych w wytłaczarkach dwuślimakowych do transportu tworzywa”, Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska 2001.
4. Boral P.: „Obróbka ślimaków stożkowych. Koła zębate, wytwarzanie, pomiar”, KBM PAN, Poznań 2004, str. 55—59.
5. Nieszporek T., Boral P.: „The design and technology of cone worms”, The Third International Scientific Conference Mechanics 2002, Rzeszów 2002, str. 259—264.
6. Nieszporek T.: *Acad. J. Manuf. Eng.* 2009, 7, 68.
7. Stasiek J., Nieszporek T.: *Polimery* 2002, 47, 441.
8. Boral P.: „The determination of inter-thread clearance in the screw plasticizing system”, 6th European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications „Transcom 2005”, University of Žilina, Slovak Republic, 2005, str. 285—288.
9. Nieszporek T.: *Mechanik* 1999, 1, 28.
10. Stasiek J.: „Effect of screw geometry and conditions of extrusion on the course of PVC plastification in a twin-screw extruder”, The Polymer Processing Society, Stuttgart 1995.
11. Nieszporek T., Boral P.: „Bases of the design and technology of variable-pitch cone worms”, The 4th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies „ICAMaT 2005” Bucharest, Romania, str. 73—78.
12. Nieszporek T., Boral P.: „Osnowy profilowaniâ koničeskich čerwâkâ s izmenâusimsâ i postoânnym šagom”, V Mieždunarodnyj Kongrec 2005 „Konstruktorsko-technologičeskââ informatika”, Moskowskij Gosudarstvennyj Technologičeskij Uniwersitet Stankin, str. 58—61.
13. Nieszporek T., Szczepanik T., Szymański W.: *Acad. J. Manuf. Eng.* 2008, 6 (2), 95.
14. Nieszporek T.: *Archiwum Budowy Maszyn* 1998, 18 (2), 135.

Wersja skorygowana 28 XI 2011 r.