

JANUSZ W. SIKORA¹⁾, BOGDAN BROEL-PLATER²⁾

Niektóre nowe problemy sterowania automatycznego procesem wytłaczania^{*)}

SOME NEW PROBLEMS OF AUTOMATIC CONTROL OF EXTRUSION PROCESS

Summary — Control of an extrusion process in the extruder with a passive grooved feed section bases on either the screw velocity change (Fig. 1) or the changes of temperatures of particular heating zones of plastifying system and extruder head. This work concerns the better use of possibility of control offered by the extruder with active grooved feed section. Its constructional features can fit the processes carrying out in it (Fig. 3). An idea of an extruder, allowing changing the direction of the grooves' torsion during the extrusion as well as to change continuously an angle of the grooves' torsion and their cross-section shape, was elaborated and then the model and a prototype were constructed. On this basis the conditions allowing selecting the optimal couple of screw velocity and an angle of the grooves' torsion leading to the optimal work of an extruder (Figs. 5 and 6) were presented. These activities and application of self-learning mechanisms, using the artificial intelligence methods, allow constructing the system of automatic control of an extrusion process, able to improve its own efficiency gradually with extruder use. A number of limitations of such optimization were pointed out.

Key words: extrusion, extruder, active grooved feed section, automatic control, control algorithm, extrusion work optimization.

Wytwarzane obecnie wytłaczarki mają strefę rowkowaną znajdującą się w cylindrze układu uplastyczniającego na długości strefy zasypu i części strefy zasilania. Rowki w tej strefie są wzdłużne lub śrubowe, na ogół o największej głębokości w strefie zasypu, a zanikające w strefie zasilania. Powodują one, że tworzywo jest lepiej pobierane z zasobnika i wprowadzane do kanału śrubowego układu uplastyczniającego. Strefa rowkowana intensyfikuje tarcie tworzywa, co zwiększa ciśnienie w strefie zasilania w takim stopniu, że może ono osiągnąć wartość maksymalną już na końcu tej strefy. Zwiększeniu ulega natężenie przepływu tworzywa, zmniejsza się pulsacja ciśnienia i fluktuacja temperatury. Rowki nie tylko przeciwdziałają ruchowi obrotowemu tworzywa razem ze ślimakiem, ale również w określony sposób ukierunkowują ruch tworzywa [1—5].

Zasadniczą zaletą strefy rowkowanej wytłaczarki jest możliwość wywierania wpływu na poszczególne funk-

cje układu uplastyczniającego. Wymuszony przez rowki wzrost natężenia przepływu tworzywa wymaga specjalnego dostosowania cech konstrukcyjnych układu uplastyczniającego, tak aby poprzez poszczególne strefy funkcjonalne ślimaka homogenizowane tworzywo mogło być transportowane pod odpowiednim ciśnieniem oraz we właściwej temperaturze [4—6]. Niewłaściwa temperatura i ciśnienie tworzywa, niejednorodność cieplna i mechaniczna tworzywa przetwarzanego, a także nieodpowiednie homogenizowanie nie tylko polimeru, ale również napelnaczy, barwników, środków uniepalniających oraz innych środków pomocniczych wpływa bowiem na natężenie przepływu tworzywa i na jakość wytłoczyny. Ślimak musi być dostosowany konstrukcyjnie do strefy rowkowanej wytłaczarki [7, 8], a zastosowanie na ślimaku elementów intensywnego ścinania i mieszania znacznie ułatwia ujednorodnienie składu, właściwości oraz struktury przetwarzanego tworzywa [9, 10].

MOŻLIWOŚCI STEROWANIA

Sterowanie procesem wytłaczania może odbywać się na dwa sposoby. Pierwszy polega na zmianie prędkości ślimaka, co zawsze wpływa na wszystkie parametry tego procesu i powoduje konieczność odpowiedniego,

¹⁾ Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: jsikora@archimedes.pol.lublin.pl

²⁾ Politechnika Szczecińska, Instytut Automatyki Przemysłowej, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin, e-mail: Bogdan.Broel-Plater@ps.pl

^{*)} Artykuł jest oparty na treści wykładu wygłoszonego w ramach VIII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Darłówko, 9—11 czerwca 2003 r.

głównie kinematycznego dostosowania poszczególnych elementów składowych linii technologicznej. Drugi sposób realizuje się poprzez zmianę temperatury poszczególnych stref grzejnych układu uplastyczniającego i głowicy wylączarskiej. Oba sposoby z różną intensywnością wpływają na przebieg procesu uplastyczniania i mogą być stosowane równocześnie. Pierwszy z nich wymaga powolnych zmian prędkości ślimaka, tak aby za nimi mogły nadażyć układy regulujące temperaturę stref grzejnych, natomiast w drugim sposobie można temperaturę nastawić szybko, ale w strefach grzejnych jest osiągnięta dopiero po pewnym czasie.

Istotne znaczenie pod względem zarówno charakterystyki całego procesu wylączania, jak i jakości otrzymywanej wytlóczyny mają cechy konstrukcyjne układu uplastyczniającego, czyli elementy geometryczne cylindra i ślimaka, a przede wszystkim strefy rowkowanej.

Wylączarki konwencjonalne wyposaża się w pasywne strefy rowkowane oraz ślimaki specjalne zaopatrzone w elementy intensywnego ścinania i mieszania [8, 11, 12]. Konstrukcje te mimo niewątpliwych zalet — prostej budowy i małego kosztu wykonania — mają również wady, mianowicie nie umożliwiają konstrukcyjnego dostosowywania cech układu uplastyczniającego do przebiegu procesów zachodzących w tym układzie. Każda zmiana konstrukcyjna, np. kształtu i liczby rowków, ich głębokości, kąta pochylenia, kierunku, kąta skręcenia oraz kształtu przekroju poprzecznego, jak również zmiana elementów geometrycznych ślimaka jest zmianą skokową, czaso- i pracochłonna. Wiąże się ona z określonymi trudnościami technicznymi (demonżem, wymianą tulei rowkowanej, montażem) oraz stratami ekonomicznymi (zatrzymanie i ponowny ruch linii technologicznej wylączania).

Obecnie obserwuje się wzrost zainteresowania nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi wylączarek zapewniającymi oprócz zmiany temperatury stref, możliwości regulowania co najmniej dwu innych niezależnych czynników, dzięki zmianie których można stosunkowo szybko wpływać na proces uplastyczniania przetwarzanego tworzywa i w ten sposób, w pełni świadomie oraz według przyjętego postępowania, sterować procesem wylączania. Jednym z tych czynników, łatwo dostępnych w każdej wylączarce, jest wspomniana już prędkość ślimaka, czyli czynnik technologiczny. Drugi czynnik (a w zasadzie zespół czynników), występujący jedynie w wylączarkach z aktywną strefą rowkowaną, stanowią elementy geometryczne tej strefy, czyli czynniki konstrukcyjne. Elementów geometrycznych ślimaka, w obecnym stanie ich konstrukcji, nie można zmieniać podczas procesu wylączania.

KONCEPCJA STEROWANIA

Istnieje co najmniej kilka opatentowanych rozwiązań konstrukcyjnych wylączarek umożliwiających zmianę elementów geometrycznych strefy rowkowanej w toku

wylączania [13—18]. Część z nich [15—18] nie jest stosowana w praktyce ze względu na, jak się wydaje, zbyt skomplikowane, a tym samym i zbyt kosztowne rozwiązania tam zaproponowane. Inne [13, 14] posłużyły do opracowania modeli funkcjonalnych, a następnie do wykonania prototypów wylączarek, jak również do zaproponowania nowej koncepcji automatycznego sterowania i regulacji procesem wylączania z aktywną strefą rowkowaną. Świadome wykorzystywanie możliwości zmiany cech konstrukcyjnych układu uplastyczniającego podczas trwania procesu wylączania wymaga jednak zastosowania nowego rozwiązania układów automatycznego sterowania procesem wylączania.

Istota tego sterowania polega na wstępnym nastawieniu takich wartości wspomnianych czynników technologicznych i elementów konstrukcyjnych, aby uzyskać wartość sterowanego parametru charakteryzującego proces wylączania (jakim może być np. natężenie przepływu tworzywa lub prędkość wylączania) zbliżoną do wartości żądanej oraz na następnej zmianie wartości tych czynników i elementów, która zapewni nie tylko żadaną wartość sterowanego parametru ale także zoptymalizuje — w sensie przyjętego kryterium jakości — proces wylączania. Wymaga to jednoczesnej, nieliniowej zmiany prędkości ślimaka oraz kąta pochylenia rowków lub głębokości rowków bądź ich liczby albo kąta skręcenia.

Z badań własnych i analizy literatury [5, 19—26] wynika, że na zmianę natężenia przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym wylączarki najprawdopodobniej bardziej wpływa zmiana prędkości ślimaka niż elementów geometrycznych strefy rowkowanej, natomiast wzrost temperatury przetwarzanego tworzywa jest zapewne bardziej powodowany zwiększeniem kąta pochylenia rowków, ich głębokości lub ich liczby albo kąta skręcenia rowków niż wzrostem prędkości ślimaka.

Dzięki wiedzy zdobytej podczas wieloletniej eksploatacji wylączarek konwencjonalnych oraz uwzględniając właściwości wylączanego tworzywa i żądany zakres wydajności wylączania można projektować zarówno układy uplastyczniające wylączarek z aktywną strefą rowkowaną (wymiary i kształt ślimaka, cylindra oraz głowicy), jak i ich układy grzejne (liczba i rozmieszczenie stref grzejnych oraz moc grzejników). Wiedza ta jest na tyle dokładna, że umożliwia także budowanie wylączarek autotermicznych, a więc takich, w których odpowiednio do zadanych wartości natężenia przepływu tworzywa dochodzi do jego uplastycznienia bez konieczności stosowania nagrzewania zewnętrznego [5, 25, 26].

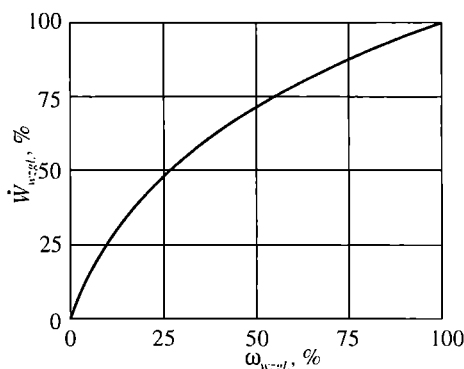
Charakterystyki eksploatacyjne wylączarek z układem uplastyczniającym o cechach zmiennych są dotychczas poznane zaledwie w zarysie [5, 21, 24, 27]. Lepsze wykorzystanie możliwości jakie dają te wylączarki wiąże się z koniecznością opracowania nowych algorytmów sterowania ich działaniem. Sterowanie takie musi bowiem uwzględniać możliwość wpływania na procesy

przebiegające wewnątrz układu uplastyczniającego wytłaczarki, także w wyniku zmiany elementów geometrycznych tego układu.

Wykorzystując wyniki własnych badań i wnioski płynące z analizy literatury opracowaliśmy koncepcje, następnie model i wreszcie zbudowaliśmy prototyp wytłaczarki, w której można podczas jej działania zmieniać w sposób oryginalny [13] kąt skręcenia rowków znajdujących się w strefie zasypu i części strefy zasilania układu uplastyczniającego oraz przedstawiliśmy nowy układ automatycznego sterowania procesem wytłaczania.

PODSTAWY NOWYCH ROZWIĄZAŃ

W układzie uplastyczniającym z rowkami zależność natężenia przepływu tworzywa od prędkości ślimaka opisuje tylko jedna krzywa (rys. 1) wyznaczona w warunkach ustalonego rozkładu temperatury wytłaczanego tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego.

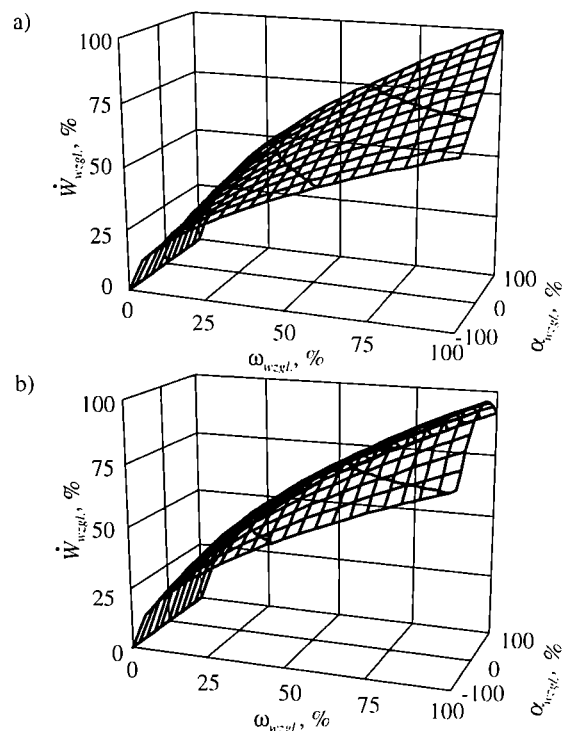


Rys. 1. Przykład ogólnej zależności względnego natężenia przepływu tworzywa [$\dot{W}_{wzgl} = (\dot{W} / \dot{W}_{maks}) \cdot 100\%$] od prędkości względnej ślimaka [$\omega_{wzgl} = (\omega / \omega_{maks}) \cdot 100\%$]; układ uplastyczniający z rowkami o stałym kącie pochylenia, indeksy dolne odnoszą się do maksymalnych wartości \dot{W} i ω

Fig. 1. Example of general dependence of relative intensity of a polymer flow [$\dot{W}_{wzgl} = (\dot{W} / \dot{W}_{maks}) \cdot 100\%$] on relative screw speed [$\omega_{wzgl} = (\omega / \omega_{maks}) \cdot 100\%$]. Plastifying system with grooves of constant slope angle. Subscripts refer to the maximal values of \dot{W} and ω

Zmiana wartości kąta skręcenia rowków w cylindrze prototypu wytłaczarki wpływa zarówno na tarcie tworzywa, jak i na proces jego pobierania przez ślimak z zasobnika. Dlatego też zamiast jednej zależności natężenia przepływu tworzywa od prędkości ślimaka, nowy układ uplastyczniający opisuje nieskończenie wiele zależności, które można przedstawić w postaci powierzchni wydajności wytłaczania (rys. 2).

Kształt powierzchni wydajności (natężenia przepływu tworzywa) może zmieniać się podczas wytłaczania



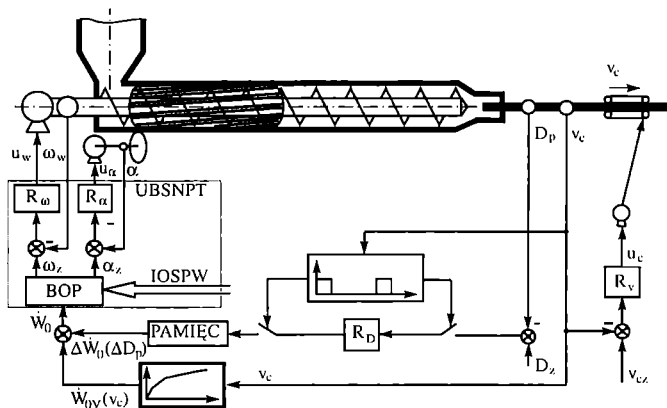
Rys. 2. Możliwe kształty powierzchni wydajności $\dot{W}(\alpha, \omega)$ wytłaczania; układ uplastyczniający z rowkami cylindra skręcanymi o kąt α : a — powierzchnia monotoniczna, b — powierzchnia niemonotoniczna; znaczenie symboli \dot{W}_{wzgl} i ω_{wzgl} jak na rys. 1, $\alpha_{wzgl} = (\alpha / \alpha_{maks}) \cdot 100\%$, dalsze objaśnienia w tekście

Fig. 2. Possible shapes of extrusion output surface $\dot{W}(\omega, \alpha)$. Plastifying system with torsion angle α of barrel grooves: a — monotonic surface, b — non-monotonic surface. Meanings of the symbols \dot{W}_{wzgl} and ω_{wzgl} as in Fig. 1, $\alpha_{wzgl} = (\alpha / \alpha_{maks}) \cdot 100\%$, further explanations in the text

ponieważ zależy on nie tylko od właściwości wytłaczanego tworzywa, ale i od rozkładu temperatury wzdłuż układu uplastyczniającego oraz od cech konstrukcyjnych układu uplastyczniającego, a zwłaszcza od elementów geometrycznych strefy rowkowanej. Zmienność kształtu powierzchni wydajności oznacza zaś, że nie można go zapisać na stałe w pamięci układu sterowania, lecz trzeba — jeśli będzie to potrzebne — wyznaczać go bezpośrednio podczas sterowania. W sterowaniu wytłaczarką z rowkami skręcanymi jest istotne także i to, że w pewnych zakresach prędkości ślimaka i rozkładu temperatury tworzywa powierzchnia wydajności wytłaczania może być niemonotoniczna (rys. 2b). W tej sytuacji, w przypadku stałej prędkości ślimaka, w obszarze niemonotonicznym powierzchni wydajności wytłaczania maksymalna wartość natężenia przepływu tworzywa występuje wówczas gdy kąt skręcenia rowków $\alpha_i(\omega_i)$ spełnia warunek

$$\alpha_{min} < \alpha_i < \alpha_{maks} \quad (1)$$

gdzie: α_{min} oraz α_{maks} — wynikająca z konstrukcji wytłaczarki, odpowiednio, minimalna i maksymalna wartość kąta skręcenia rowków.



Rys. 3. Układ regulacji kaskadowej stabilizujący wymiary wytłoczyny wytwarzanej przez wyltaczarkę ze skręcanymi rowkami: UBSNPT — układ bezpośredniego sterowania natężeniem przepływu tworzywa; BOP — blok optymalizacji pary wartości: prędkość ślimaka i kąt skręcenia rowków; IOSPW — wektor informacji o stanie procesu wytłaczania; R_α , R_ω i R_v — odpowiednio regulator kąta skręcenia rowków cylindra, prędkości ślimaka wyltaczarki i prędkości wytłaczania wytworu; R_D — regulator impulsowy; u_α , u_ω oraz u_c — odpowiednio sygnał sterujący kątem skręcenia rowków, prędkością ślimaka wyltaczarki i prędkością wytłaczania wytworu; α_z , ω_z oraz v_{cz} — odpowiednio wartość zadana kąta skręcenia rowków, prędkości obrotowej ślimaka wyltaczarki i prędkości wytłaczania; D_z — zadane wymiary poprzeczne wytworu; ω_ω — prędkość obrotowa ślimaka wyltaczarki; v_c — prędkość wytłaczania; D_p — zmierzone wymiary poprzeczne wyprodukowanego wytworu; \dot{W}_0 — zadana wartość natężenia przepływu tworzywa

Fig. 3. Cascade control system stabilizing the dimensions of the extrudate produced in the extruder with torsional grooves: UBSNPT — polymer flow intensity direct control system; BOP — unit of an optimization of the couple: screw speed and angle of the grooves' torsion values; IOSPW — vector of information on extrusion process stage; R_α , R_ω and R_v — control units of angle of the grooves' torsion, screw speed and extrusion rate, respectively; R_D — impulse control unit; u_α , u_ω and u_c — the signals controlling an angle of the grooves' torsion, screw speed and extrusion rate, respectively, α_z , ω_z and v_{cz} — set values of an angle of the grooves' torsion, screw rotational speed and extrusion rate, respectively; D_z — set crosswise dimensions of the product; ω_ω — screw rotational speed; v_c — extrusion rate; D_p — measured crosswise dimensions of the product; \dot{W}_0 — set value of polymer flow intensity

Ponieważ kształt powierzchni wytłaczania, zależny od wielu czynników zmiennych podczas wytłaczania, nie jest znany, to warunek (1) oznacza, że optymalnej wartości kąta skręcenia rowków należy poszukiwać doświadczalnie podczas użytkowania wyltaczarki.

Podobnie jak w przypadku wyltaczarki konwencjonalnej, układ sterowania wyltaczarką z rowkami skręcanymi powinien realizować dwa zadania polegające na utrzymywaniu [28]:

— natężenia przepływu tworzywa o wartości $\dot{W}_0(v_c)$ zależnej od prędkości v_c wytłaczania, dzięki czemu przekrój poprzeczny otrzymywanej wytłoczyny powinien mieć wymagane wymiary;

— rozkładu temperatury $v_t(y)$ tworzywa wytłaczanego wzdłuż długości układu uplastyczniającego, odpowiedniego do zadanej wartości natężenia $\dot{W}_0(v_c)$ przepływu tworzywa, co z kolei zapewni wytłoczynie wymaganą jakość.

Poniżej przedstawiamy dokładniejszy opis pierwszego z tych zadań, ponieważ ze względu na właściwości prototypu wyltaczarki nie ma ono odpowiednika w omówionych uprzednio układach sterowania wyltaczarek konwencjonalnych. Natomiast drugie zadanie realizują opisane wcześniej [28] układy sterowania wyltaczarkami konwencjonalnymi.

Aby utrzymać stałe natężenie przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym i w głowicy wyltaczarskiej prototypu wyltaczarki należy jednocześnie oraz w sposób skoordynowany sterować dwiema wielkościami, tzn. prędkością ślimaka i kątem skręcenia rowków cylindra. Ponieważ wartość natężenia przepływu tworzywa musi zapewniać utrzymanie stałych wymiarów wytłoczyny, to do sterowania działaniem wyltaczarki z rowkami skręcanymi należy zastosować kaskadowy układ sterowania pokazany na rys. 3.

Można zauważyć, że układ widoczny na rys. 3 to zmodyfikowana wersja układu sterowania stabilizującego wymiary wytłoczyny wytwarzanej w wyltaczarcie konwencjonalnej [29]. Układy stabilizujące wymiary wytłoczyny działają w obu tych wariantach jednakowo, a różnica pomiędzy nimi polega na tym, że w układzie pokazanym na rys. 3 algorytm sterowania wyznacza żadaną wartość natężenia przepływu tworzywa a nie żadaną wartość prędkości ślimaka wyltaczarki.

ZAGADNIENIA ALGORYTMU I OPTYMALIZACJI

Projektując algorytm działania układu bezpośrednio sterowania natężeniem przepływu tworzywa (\dot{W}) pokazanego na rys. 3 należy uwzględnić to, że żadaną wartość \dot{W} można uzyskać w odniesieniu do wielu (teoretycznie biorąc, nieskończenie wielu) par wartości prędkości ω_{0i} ślimaka wyltaczarki i kąta α_{0i} skręcenia rowków, spełniających warunek:

$$\{\omega_{0i}, \alpha_{0i}\} \Rightarrow \dot{W}(\omega_{0i}, \alpha_{0i}) = \dot{W}(v_c); \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Układ sterowania natężeniem przepływu tworzywa musi być zatem układem regulacji ekstremalnej [30], który spośród wielu par $\{\omega_i, \alpha_i\}$ spełniających warunek (2) umożliwi wybór optymalnej pary prędkości ślimaka i kąta skręcenia rowków $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$. Zadanie to realizuje blok optymalizacji pary — prędkość ślimaka/kąt skręcenia rowków, wykorzystując w tym celu wektor informacji o stanie procesu wytłaczania.

Wybór optymalnej pary $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$ zalicza się do typowych zadań nieliniowej optymalizacji statycznej

[30—32], ponieważ podczas tego wyboru trzeba także uwzględnić ograniczenia:

— wartości kąta skręcenia rowków α , wyrażone zależnością

$$\alpha_{min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{maks} \quad (3)$$

— wartości naprężenia skręcającego σ_s w ślimaku oraz w jego układzie napędowym; można je w trakcie wytłaczania określać bezpośrednio, wyposażając wytłaczarkę w odpowiednie czujniki, lub pośrednio — obliczając np. z wartości natężenia prądu pobieranego przez silnik napędzający ślimak;

— wartości momentu napędowego wytwarzanego w sposób ciągły przez silnik obracający ślimak;

— wartości prędkości ślimaka wynikające z maksymalnej szybkości działania pozostałych urządzeń linii technologicznej i konieczność zapewnienia równomiernego wypływu tworzywa z dyszy głowicy wytłaczarskiej, czyli

$$\omega_{min} \leq \omega_i \leq \omega_{maks} \quad (4)$$

— zdolności układu sterowania temperaturą stref grzejnych wytłaczarki do dostatecznie dokładnego utrzymania — odpowiedniego do wydajności wytłaczania — rozkładu temperatury wytłaczanego tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego.

Ostatnie z wymienionych ograniczeń oznacza konieczność uwzględniania podczas poszukiwania optymalnej pary $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$ wpływu zmieniającej się ilości powstającego ciepła generowanego wskutek tarcia wewnętrznego. W przypadku niektórych par prędkości ślimaka i kąta skręcenia rowków $\{\omega_i, \alpha_i\}$ ciepła tego może być tak dużo, że pomimo działania układów regulacji temperatury stref wytłaczarki rozkład temperatury tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego i głowicy wytłaczarskiej nie będzie właściwy. Zachowanie tego warunku staje się łatwe gdy działaniem wytłaczarki steruje komputer, bowiem wówczas algorytm optymalizacji uzyskuje dostęp do wszystkich niezbędnych informacji.

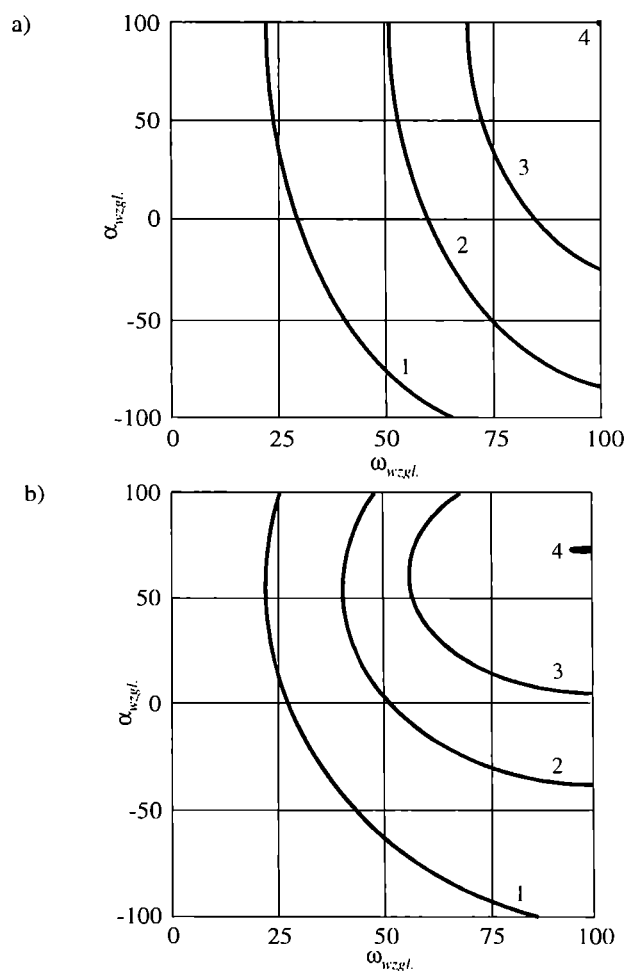
Aby znaleźć spośród wielu par $\{\omega_i, \alpha_i\}$ spełniających warunek (2) parę optymalną $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$ należy sformułować odpowiednie kryterium oceny jakości wyboru takiej pary. Ze względu na konieczność określania wartości tego kryterium w czasie rzeczywistym, czyli podczas działania układu sterowania, musi to być kryterium o wartości wyznaczanej z wielkości, które można bezpośrednio zmierzyć lub wyznaczyć pośrednio z pomiarów innych wielkości.

Podczas optymalizacji działania układu uplastyczniającego można minimalizować wartość takich wielkości, jak np. różnica pomiędzy wartością średniej temperatury lub ciśnienia tworzywa w głowicy lub dyszy wytłaczarki a wartością zadaną tej wielkości, bądź też zmienność lub wariancję temperatury albo ciśnienia tworzywa w głowicy lub dyszy wytłaczarki.

Wydaje się jednak, że szczególnie ważnym kryterium jakości wyboru współrzędnych pary $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$ może być całkowita ilość energii dostarczanej do układu

uplastyczniającego. W przypadku korzystania z tego kryterium optymalną parę prędkości ślimaka i kąta skręcenia rowków $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$ stanowi ta para $\{\omega_{0i}, \alpha_{0i}\}$ w odniesieniu do której wartość energii dostarczanej do układu jest najmniejsza. Podczas optymalizacji należy oczywiście uwzględniać ilość energii zarówno pobieranej przez silnik obracający ślimak wytłaczarki, jak i dostarczanej do grzejników stref grzejnych lub do wentylatorów chłodzących te strefy.

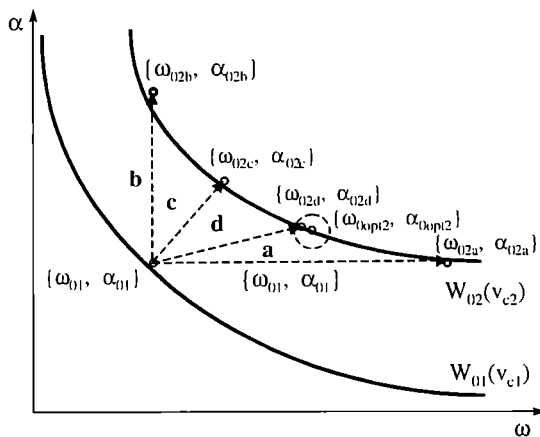
W warunkach stałej wartości zadanego natężenia przepływu tworzywa $\dot{W}_0(v_{c1})$ poszukiwanie optymalnej pary współrzędnych $\{\omega_{0opt1}, \alpha_{0opt1}\}$ odbywa się wzdłuż



Rys. 4. Linie stałej względnej wydajności: a — w przypadku monotonicznej powierzchni wydajności $\dot{W}(\omega, \alpha)$ pokazanej na rysunku 2a, b — w przypadku niemonotonicznej powierzchni wydajności $\dot{W}(\omega, \alpha)$ pokazanej na rysunku 2b; 1 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 25\%$, 2 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 50\%$, 3 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 75\%$, 4 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 100\%$; znaczenia symboli α_{wzgl} i ω_{wzgl} jak na rys. 2

Fig. 4. Lines of relative constant output: a — for monotonic output surface $\dot{W}(\omega, \alpha)$ presented in Fig. 2a, b — for non-monotonic output surface $\dot{W}(\omega, \alpha)$ presented in Fig. 2b. 1 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 25\%$, 2 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 50\%$, 3 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 75\%$, 4 — $\dot{W}(\omega, \alpha) = 100\%$. Meanings of the symbols α_{wzgl} and ω_{wzgl} as in Fig. 2

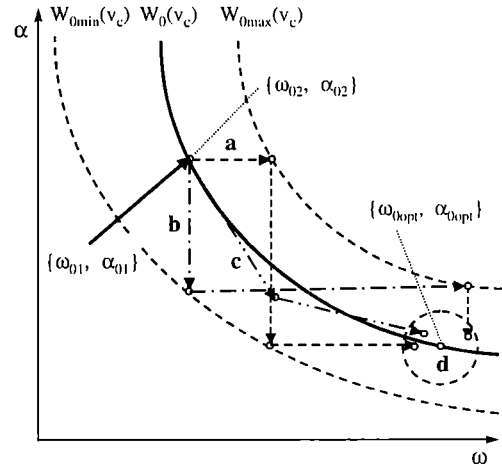
linii stałej wydajności wytłaczania. Linie taką na płaszczyźnie (ω, α) tworzą pary (ω_0, α_0) spełniające warunki (2), (3) i (4). W zależności od kształtu powierzchni $W(\omega, \alpha)$ oraz wartości zadanej natężenia $W_0(v_c)$ linie stałej wydajności wytłaczania mogą mieć różny kształt (rys. 4), a znajomość tego kształtu powinna znacznie ułatwić znalezienie współrzędnych optymalnej pary prędkości ślimaka i kąta skręcenia rowków. Należy przy tym pamiętać, że zakresy możliwych do wykorzystania prędkości ślimaka i kąta skręcenia rowków są ograniczone przez wartości wytwarzanego w sposób ciągły maksymalnego momentu napędowego silnika obracającego ślimak oraz dopuszczalnego naprężenia skręcającego w układzie napędowym (linia 4 na rys. 4).



Rys. 5. Przykłady wariantów postępowania podczas zmiany wydajności: a — zmiana prędkości obrotowej ślimaka, b — zmiana kąta skręcenia rowków, c — najmniejsza zmiana obu wielkości, d — postępowanie prawie optymalne, $(\omega_{02i}, \alpha_{02i})$ — para początkowa wyznaczana przez i-procedurę
Fig. 5. Examples of procedures during the output change: a — change of screw rotational speed, b — change of an angle of the grooves' torsion, c — smallest changes of both values, d — almost optimal procedure, $(\omega_{02i}, \alpha_{02i})$ — initial couple designed by i-procedure

Po zmianie wartości zadanej prędkości v_c wytłaczania z v_{c1} do v_{c2} trzeba zmienić parę $(\omega_{01}, \alpha_{01})$ na parę $(\omega_{02}, \alpha_{02})$ znajdującą się na nowej linii stałej wydajności. Można wykonać to z różną dokładnością i stosując różne warianty postępowania (rys. 5), jednak także w tym przypadku wiedza o kształcie powierzchni wydajności może znacznie przyspieszyć proces znajdowania współrzędnych nowej optymalnej pary $(\omega_{0opt2}, \alpha_{0opt2})$. Wykorzystując np. klasyczne gradientowe metody optymalizacji funkcji wielu zmiennych [31] można wyznaczyć nową parę $(\omega_{02e}, \alpha_{02e})$, osiągnięcie której wymaga najmniejszych zmian prędkości obrotowej ślimaka wytłaczarki i kąta skręcenia rowków. Jeśli jednak w pamięci układu sterowania — obok wiedzy o powierzchni wydajności — zawarta będzie także wiedza o energochłon-

ności procesu wytłaczania, wówczas możliwe stanie się określenie współrzędnych nowej pary $(\omega_{02d}, \alpha_{02d})$ znajdującej się na nowej linii stałej wydajności i od razu w pobliżu pary docelowej $(\omega_{0opt2}, \alpha_{0opt2})$. Postępowanie, które to umożliwia, można nazwać postępowaniem prawie optymalnym, zaś jego skuteczność zależy od dokładności informacji o właściwościach procesu wytłaczania zawartej w pamięci układu sterowania.



Rys. 6. Przykłady wariantów postępowania podczas optymalizacji działania wytłaczarki: a, b — przemienne zmiany prędkości ślimaka i kąta skręcenia rowków cylindra, c — zmiany równoczesne, d — układ rozwiązań prawie optymalnych, $(\omega_{01}, \alpha_{01})$ — poprzednia para, $(\omega_{02}, \alpha_{02})$ — początkowa nowa para, $W_{0maks}(v_c)$ i $W_{0min}(v_c)$ — graniczne linie stałej wydajności zapewniające utrzymywanie wymiarów wytłoczony zadaną dokładnością

Fig. 6. Examples of procedures for the extruder work optimization: a, b — alternating changes of screw speed and angle of the barrel grooves' torsion, c — simultaneous changes, d — system of almost optimal solutions, $(\omega_{01}, \alpha_{01})$ — previous couple, $(\omega_{02}, \alpha_{02})$ — initial new couple. $W_{0maks}(v_c)$ i $W_{0min}(v_c)$ — limit lines of constant output warranting the extrudate dimensions kept with a set precision

Po osiągnięciu, z zadaną dokładnością, współrzędnych dowolnej nowej pary $(\omega_{02}, \alpha_{02})$ leżącej w dostatecznie bliskim otoczeniu nowej linii stałej wydajności, należy zoptymalizować położenie pary na tej linii. Także i w tym przypadku można to wykonać stosując różne sposoby postępowania. Przykłady niektórych spośród nich są pokazane na rys. 6. Efektywność zastosowanego postępowania zależy od stopnia znajomości kształtu linii i powierzchni stałej wydajności w otoczeniu tej linii. Wiedza ta pozwala na określenie granicznych wartości dopuszczalnych zmian prędkości ślimaka wytłaczarki i kąta skręcenia rowków odpowiadających zachowaniu zadanego wymiaru wytłoczony. Pozwala to na stosunkowo szybko znalezienie współrzędnych optymalnej pary $(\omega_{0opt}, \alpha_{0opt})$.

Zastosowanie do optymalizacji pary $\{\omega_{0opt}, \alpha_{0opt}\}$ samouczących się mechanizmów wykorzystujących logikę rozmytą powinno umożliwić zbudowanie układu sterowania automatycznego, który w trakcie użytkowania wyłaczarki stopniowo poprawia swoją skuteczność dzięki coraz dokładniejszemu odwzorowywaniu w swej pamięci właściwości sterowanego procesu wytłaczania; zapewni to szybsze osiągnięcie optymalnych warunków wytłaczania [32]. Opracowanie takiego algorytmu sterowania i optymalizacji współrzędnych punktu działania układu uplastyczniającego wyłaczarki będzie tematem dalszych prac.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 7 T08E 062 20.

LITERATURA

1. Stevens M.: „Extruder Principles and Operation”, Elsevier Applied Science Publishers, Londyn 1986.
2. Hyun K. S., Spalding A.: „An Experimental Investigation of Solids Conveying in Smooth and Grooved Barrel Single-screw Plasticating Extruders”, The Polymer Processing Society, Fourteen Annual Meeting, Jokohama, Japonia 1998, str. 405.
3. Anonim: *Kunststoffe* 1994, **84**, 1114.
4. Diakun J.: „Podstawy uaktywnienia strefy zasilania w konstrukcji wyłaczarki jednoślismakowej”, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin 1991, str. 17—24.
5. Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wyłaczarki”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
6. Grünschloß E.: *Maschinenmarkt* 1985, **69**, 1347.
7. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkokształczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993, str. 18—20, 30.
8. Stasiek J.: *Polimery* 1988, **33**, 278.
9. Wortberg J., Michels R.: *Mod. Plast. Intern.* 1998, nr 12, 93.
10. Fusch G.: *Plastverarbeiter* 1968, **19**, 765; *ibid* 1969, **20**, 237; *ibid* 1970, **20**, 235.
11. Rauwendaal Ch.: „Polymer Extrusion”, Carl Hanser Verlag, Monachium 2001, str. 84—96.
12. Rauwendaal C., Noriega M.: „Troubleshooting the Extrusion Process”, Carl Hanser Verlag, Monachium 2001, str. 81—91.
13. *Pat. pol.* 174 068 (1998).
14. *Pat. pol.* 174 623 (1998).
15. *Pat. USA* 4 462 692 (1983).
16. *Pat. USA* 4 678 339 (1985).
17. *Pat. USA* 5 783 225 (1997).
18. *Pat. USA* 5 909 958 (1999).
19. Sikora R. i inni: *Przegląd Mech.* 1980, **39**, 8.
20. Sikora R., Tomaszewski J.: *Polimery* 1982, **27**, 170.
21. Sikora J. W.: *Polimery* 1998, **43**, 548.
22. Sikora J. W.: „New Constructions of Active Grooved Feed Extruders”, The Polymer Processing Society, Chang Gung University, Tajpei (Tajwan) 2002, str. 115.
23. Sikora J. W.: *Polym. Eng. Sci.* 2001, **41**, 1636.
24. Rauwendaal Ch., Sikora J. W.: *Intern. Polym. Processing* 2000, **15**, 133.
25. McKelvey J. M., Bernhard E. C.: *Soc. Plast. Eng. J.* 1954, **3**, 22.
26. Sikora J. W.: *Polimery* 1994, **39**, 7 (tłumaczenie w *Intern. Polym. Sci. Technol.* 1994, **21**, nr 12, T/67).
27. Sikora J. W.: *Polimery* 1997, **42**, 565 (tłumaczenie w *Intern. Polym. Sci. Technol.* 1997, **24**, nr 12, T/97).
28. Broel-Plater B., Sikora J. W.: *Polimery* 2004, **49**, 114.
29. Broel-Plater B.: „Sterowanie procesem wytłaczania tworzywa sztucznego”, XIII Krajowa Konferencja Automatyki KKA'99, Opole 1999, t. 2., str. 319.
30. Fiendeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: „Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji”, PWN, Warszawa 1997, str. 157—284.
31. Praca zbiorowa: „Poradnik inżyniera automatyka” (red. Fiendeisen W.), WNT, Warszawa 1969, str. 72, 485—487.
32. Piegat A.: „Fuzzy Modelling and Control”, Physica-Verlag, Springer-Verlag Co., Heidelberg—Nowy Jork 2001, str. 405—494.