

ELŻBIETA BOCIĄGA¹⁾, TOMASZ JARUGA¹⁾, ROBERT SIKORA²⁾

Wybrane zagadnienia wtryskiwania precyzyjnego

CZĘŚĆ II. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA JAKOŚĆ WYPRASEK PRECYZYJNYCH^{*) **)}

Streszczenie — W artykule o charakterze literaturowego przeglądu monograficznego przedstawiono wtryskiwanie precyzyjne jako proces realizowany w układzie roboczym obejmującym następujące elementy: człowieka–wykonawcę, formę wtryskową, wtryskarkę, metodę wtryskiwania, warunki (parametry) wtryskiwania oraz rodzaj wtryskiwanego tworzywa. Szczegółowo omówiono wpływ każdego z tych elementów na końcową jakość uzyskiwanych wyprasek i jej powtarzalność, uwzględniając przy tym strukturę materiału, właściwości mechaniczne i inne cechy użytkowe, masę, skurcz, stan naprężeń oraz dokładność wymiarów.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, wtryskarki precyzyjne, jakość wyprasek, wykonawca, forma wtryskowa, tworzywo przetwarzane, powtarzalność wyników.

SELECTED PROBLEMS OF PRECISION INJECTION MOLDING. PART II. FACTORS INFLUENCING THE QUALITY OF PRECISE MOLDINGS

Summary — In the literature review the precise injection molding is presented (Fig. 6) as a process realized in a working system consisting of the following elements: man-operator, injection mold (Fig. 1—3), injection molding machine, injection method, injection parameters (Table 1) and the type of polymer. The effects of all the factors on the final quality of moldings obtained and its repeatability were discussed in detail. The material structure, mechanical properties and other functional features, weight, shrinkage (Fig. 4 and 5), stress state and accuracy of dimensions of molding were taken into account.

Key words: injection molding, precise injection molding machines, molding quality, man-operator, injection mold, polymer, repeatability of results.

W pierwszej części artykułu poświęconego procesowi wtryskiwania precyzyjnego [1] przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z określaniem wymiarów wyprasek precyzyjnych oraz stabilnością tych wymiarów. Zamieszczono tam również ogólne informacje dotyczące czynników wpływających na jakość wyprasek wytwarzanych tą metodą, czyli przede wszystkim na dokładność kształtu, wymiarów i położenia oraz na stan powierzchni. W wielu przypadkach istotne są również właściwości mechaniczne, cieplne, elektryczne bądź optyczne wyprasek, które mogą decydować o ich przydatności do zastosowania np. na części obciążone podczas użytkowania lub elementy o szczególnych cechach optycznych (soczewki). Określone warunki prowadzenia procesu wtryskiwania umożliwiają oddziaływanie na charakterystykę strukturalną wyprasek, mia-

nowicie na grubość warstwy wierzchniej i rdzenia wypraski, stopień krystaliczności w przypadku tworzyw częściowo krystalicznych, albo orientację makrocząsteczkową, co z kolei wpływa na właściwości użytkowe wytworów [2—6]. Proces wtryskiwania precyzyjnego realizuje się w układzie roboczym, w skład którego wchodzi: człowiek–wykonawca, narzędzie przetwórcze (forma wtryskowa), maszyna (wtryskarka) i urządzenia uzupełniające oraz przetwarzane tworzywo. Właśnie elementy tego układu i wzajemne oddziaływania pomiędzy nimi jak również ustalone warunki oraz wybrana metoda wtryskiwania decydują o jakości wytworzonych wyprasek.

CZŁOWIEK–WYKONAWCA

Operacje składające się na proces wtryskiwania są wprawdzie często w pełni zautomatyzowane, a do ich realizacji wykorzystuje się roboty, to jednak efektywne wtryskiwanie precyzyjne wciąż jeszcze w dużym stopniu zależy od bezpośrednich działań człowieka–wykonawcy. Proces ten jest prowadzony na granicy obecnych możliwości technologii wtryskiwania, co wynika z bardzo wąskich zakresów jego warunków. Niezbędne jest

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją, Al. Armii Krajowej 19C, 42-200 Częstochowa; e-mail: bociaga@kpts.pcz.czyst.pl

²⁾ Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin; e-mail: r.sikora@pollub.pl

^{*)} Artykuł stanowi rozszerzoną wersję wystąpienia przedstawionego na XIII Profesorskich Warsztatach Naukowych pt. „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Lublin, 8—10 czerwca 2008 r.

^{**)} Część I — por. Polimery 2009, 54, 342.

ciągłe monitorowanie i kontrola przebiegu wtryskiwania, mogą też być konieczne częste interwencje wysoko wykwalifikowanego i doświadczonego pracownika. Niedoskonałość wykonawcy, związana przede wszystkim z ograniczeniem zdolności rozpoznawczych zmysłów wzroku, słuchu i dotyku, może oddziaływać na dokładność nastawiania i kontrolowania poprawności działania wtryskarki, formy oraz urządzeń uzupełniających i oprzyrządowania technologicznego, ustalania i kontrolowania warunków wtryskiwania, a także odczytywania i oceny wskazań przyrządów [7]. Istotne znaczenie ma ponadto stan psychiczny wykonawcy, na przykład jego zmęczenie, roztargnienie lub braki w umiejętności postępowania, przejawiające się stosowaniem niewłaściwej techniki czynności wykonywanej podczas procesu przetwórstwa tworzyw. W przypadku wtryskiwania precyzyjnego należy więc zwracać szczególną uwagę na kwalifikacje pracowników bezpośrednio zaangażowanych w realizację tego procesu.

Człowiek odgrywa ważną rolę na etapach wyboru tworzywa na wypraski, określania sposobu postępowania z tworzywem przed wtryskiwaniem, projektowania wypraski, opracowania procesu technologicznego wytwarzania wyprasek oraz projektowania, wykonywania, montażu i użytkowania formy wtryskowej. Człowiek decyduje również o wyborze właściwej wtryskarki, jej dodatkowym wyposażeniu i obsłudze, a ponadto musi podejmować decyzje odnośnie do metody wtryskiwania, na przykład zastosowania metody wtryskiwania wspomaganego gazem w celu polepszenia jakości powierzchni wypraski.

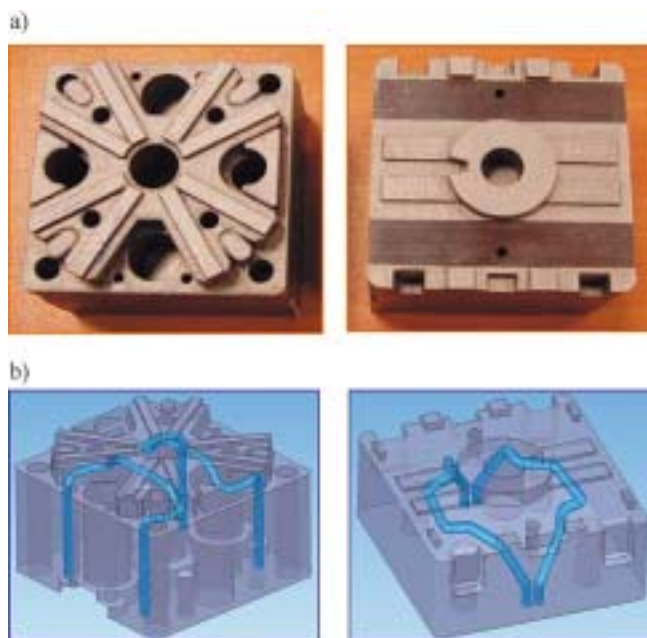
FORMA WTRYSKOWA

Formy do wtryskiwania precyzyjnego muszą mieć bardzo starannie zaprojektowaną budowę i dokładnie wykonane podzespoły, zapewniające precyzyjne ich prowadzenie. Ze względu na nieuniknioną niedoskonałość realizowania procesu wtryskiwania dokładność wytworzenia formy musi być większa niż dokładność wyprasek. Bardzo istotna jest budowa i wykonanie kanałów przepływowych oraz gniazd formujących. Wtryskiwanie precyzyjne z wykorzystaniem form jednogniazdowych nie stwarza dużych trudności pod warunkiem, że formy te charakteryzują się dużą sztywnością [3]. W formach wielogniazdowych jest natomiast konieczne utrzymanie jednakowych warunków wypełnienia i zestania tworzywa we wszystkich gniazdach. Należy przede wszystkim zapewnić identyczną temperaturę gniazd w fazie wypełnienia oraz taką samą intensywność ich wypełnienia, co jednocześnie pozwala na uzyskiwanie jednakowego ciśnienia tworzywa w gniazdach.

Identyczną temperaturę gniazd uzyskuje się poprzez regulację temperatury formy a także zastosowanie poprawnie zaprojektowanego układu chłodzenia formy w przypadku tworzyw termoplastycznych lub grzania podczas przetwarzania tworzyw utwardzalnych. Ukła-

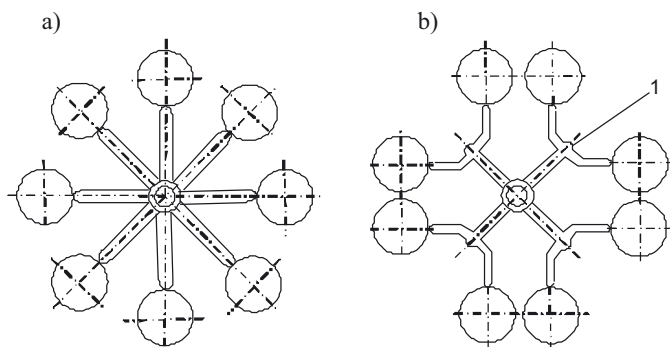
dy takie powinny zapewnić równomierne ochładzanie całej wypraski w gnieździe. W starszych układach, w których kanały chłodząco-ogrzewające są wykonywane metodami obróbki skrawaniem, nie zawsze można uzyskać jednakową intensywność ochładzania/grzania a więc i zestania (lub utwardzania) wszystkich obszarów wypraski ze względu na trudności z dotrzymaniem żądanej (najczęściej jednakowej) odległości kanałów od powierzchni gniazda [7].

Nowe rozwiązanie, polepszające w istotny sposób równomierność ochładzania/grzania wyprasek stanowią formy z kanałami umiejscowionymi w jednakowej odległości od powierzchni gniazda formującego, nazywane kanałami konformalnymi [9—13]. W tego rodzaju formach montuje się wkładki formujące z kanałami chłodząco-ogrzewającymi wykonane metodami wytwarzania warstwowego, spośród których najbardziej znana jest metoda bezpośredniego laserowego spiekania metali (DMLS — *Direct Metal Laser Sintering*). Ponadto, do wytwarzania wkładek formujących z proszków stali narzędziowych i stopowych odpowiednie są metody znane pod angielskimi określeniami SLM (*Selective Laser Melting*), SLS (*Selective Laser Sintering*), 3D Metal Printing, *Laser Cusing*, *Elektron Beam Melting* [11]. Przykłady dwóch wkładek formujących formy wtryskowej z konformalnymi kanałami chłodzącymi, wykonanych ze stali narzędziowej WCLV metodą SLM, pokazano na rysunku 1a, natomiast na rysunku 1b jest widoczny układ kanałów chłodzących w obydwu tych wkładkach.



Rys. 1. Wkładki formujące formy wtryskowej z konformalnymi kanałami chłodzącymi (a) oraz układ kanałów chłodzących w tych wkładkach (b) (forma wtryskowa SI „Spamel” w Twardogórze)

Fig. 1. Injection mold inserts with conformal cooling channels (a) and set of cooling channels in the insert (b) (injection mold form SI „Spamel” in Twardogóra, Poland)



Rys. 2. Układy kanałów doprowadzających w wielogniazdowych formach wtryskowych: a) gwiaździsty, b) równoległy; 1 — wybranie w kanale

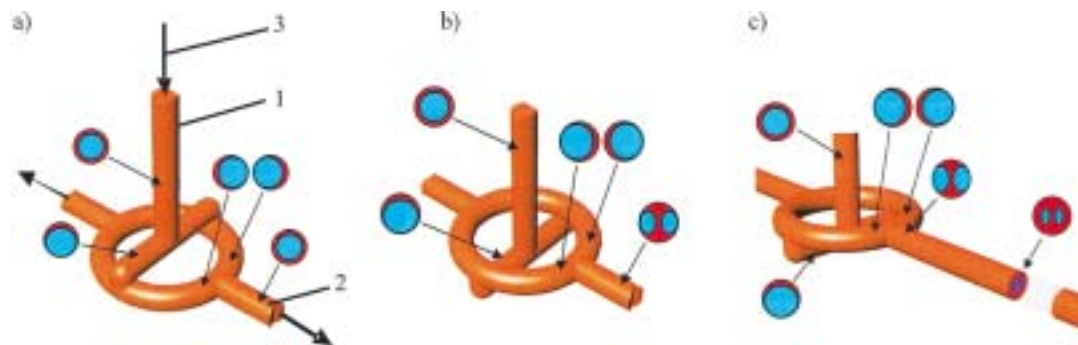
Fig. 2. Sets of channels in multicavity molds: a) star-shaped, b) parallel (geometrically balanced); 1 — recess in a channel

Jednakową intensywność wypełniania tworzywem gniazd formujących uzyskuje się na drodze doboru kształtu i rozmiarów kanałów przepływowych oraz ich rozmieszczenia w formie — takiego jakie zapewnia identyczne spadki ciśnienia tworzywa w gnieździe. Warunki te są spełnione w przypadku gwiaździstego układu kanałów doprowadzających, o jednakowej długości i takim samym przekroju poprzecznym oraz z jednakowymi przewężkami (rys. 2a) [3, 8]. Występują tu jednak niekorzystne warunki bezpośredniego wypełniania gniazd formujących strumieniem tworzywa z ochłodzonym czołem tego strumienia. Lepszym rozwiązaniem jest pokazany na rysunku 2b układ nazywany równoległym, w którym zaprojektowano dodatkowe wybranie (1) w kanale, gromadzące ochłodzone tworzywo z czoła strumienia.

W formach z równoległym układem kanałów doprowadzających należy uwzględnić kinetykę przepływu tworzywa w tych kanałach, zwłaszcza zaś zmianę kierunku przepływu strumienia tworzywa na drodze od kanału wlewowego do gniazd formujących [4]. Wykaza-

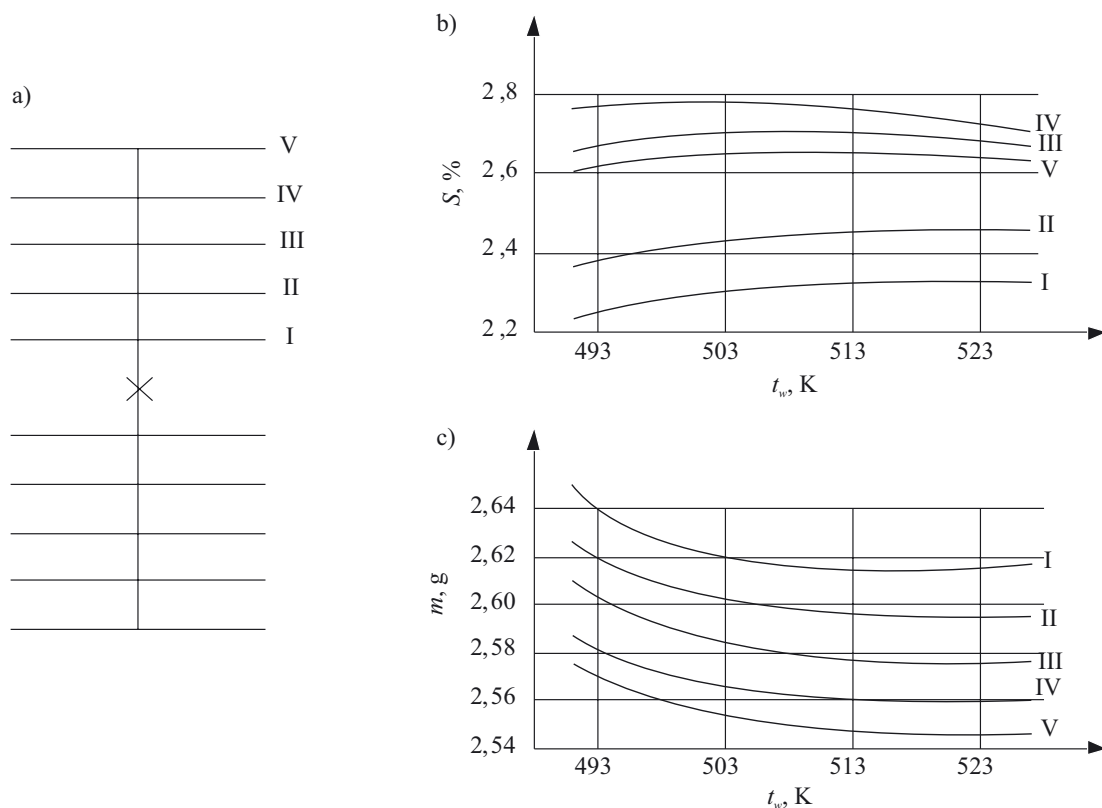
no, że w równoległych układach kanałów doprowadzających o takiej samej długości oraz jednakowym przekroju poprzecznym odpowiadających sobie odcinków kanałów i przewężek nie można uzyskać równomiernego wypełniania gniazd formujących wówczas, gdy strumienie tworzywa zmieniają kierunek przepływu w różny sposób. Wynika to z faktu, że po zmianie kierunku przepływu występuje asymetria strumienia tworzywa, odmienna w przypadku zmiany kierunku w stronę prawą bądź lewą. Powoduje to zróżnicowanie masy, struktury i właściwości wyprasek; zjawisko to omawialiśmy w licznych wcześniejszych publikacjach [14—17]. Beaumont zaproponował specjalną budowę rozgałęzień kanałów doprowadzających, umożliwiającą uzyskanie symetrycznego strumienia tworzywa również po zmianie kierunku przepływu [18]. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tych rozgałęzień (nazywanych *MeltFlipper*) ilustruje rys. 3, gdzie pokazano — w przekroju poprzecznym kanałów — rozkład obszarów intensywnej ścinania (zaznaczonych kolorem czerwonym). Ich zastosowanie zapewnia równoczesne wypełnianie gniazd formujących tworzywem o jednakowych właściwościach i uzyskiwanie dzięki temu wyprasek precyzyjnych, wymaga jednak większych nakładów.

Ogólnie biorąc, formy z równoległymi układami kanałów doprowadzających mają zwykle duże rozmiary i znaczną masę w stosunku do krotności gniazd, co powoduje, że koszt ich wykonania i użytkowania jest duży i pogarsza się opłacalność procesu wtryskiwania. Często więc stosuje się formy z szeregowym układem gniazd formujących, charakteryzującym się różną długością drogi przepływu tworzywa do gniazd. Kanały doprowadzające, ze względu na koszt ich wykonania, mają tu jednakowy przekrój poprzeczny, co powoduje, że spadki ciśnienia tworzywa na drodze jego przepływu do poszczególnych gniazd są różne. W praktyce, aby uzyskać jednoczesne wypełnianie gniazd w warunkach różnej długości drogi przepływu w kanałach, stosuje się korektę przewężek, różnicując ich przekroje poprzeczne lub,



Rys. 3. Rozwiązania konstrukcyjne (*MeltFlipper*) rozgałęzień kanałów doprowadzających form wtryskowych z rozkładem obszarów intensywnej ścinania: a) — w kanale (2) takim samym jak w kanale (1); b) oraz c) — w kanale (2) rozkład symetryczny, ale inny niż w kanale (1) (3 — kierunek przepływu tworzywa) [17]

Fig. 3. Designs (by *MeltFlipper*) of mold runners branching and the distribution of intensive shear regions: a) in channel (2) the same as in channel (1); b) and c) in channel (2) symmetrical distribution but different than in channel (1) (3 — melt flow direction) [17]



Rys. 4. Zależność skurczu pierwotnego poprzecznego S (b) oraz masy wyprasek m (c) od temperatury wtryskiwania t_w , w przypadku ciśnienia wtryskiwania 88,3 MPa i temperatury formy 318 K; a) — schemat ułożenia gniazd w formie dwudziestogniazdowej (liczby od I do V oznaczają gniazda będące przedmiotem analizy) [24]

Fig. 4. Dependence of primary crosswise shrinkage S (b) and molding weight m (c) on injection temperature (T_w), for injection pressure 88.3 MPa and mold temperature 318 K; a) — lay-out of cavities in 20-cavity mold (numbers I to V refer to cavities analyzed) [24]

rzadziej, długość. Mianowicie, przewężki położone bliżej kanału centralnego mają mniejsze przekroje poprzeczne lub są dłuższe niż przewężki oddalone od tego kanału [3—5, 8, 19]. Zawsze jednak należy pamiętać o tym, że warunki przepływu tworzywa w przewężkach o różnych przekrojach poprzecznych nie są jednakowe: tworzywo przepływające przez przewężkę o mniejszym przekroju ulega większemu odkształceniu spowodowanemu ścinaniem, a ponadto — wskutek bardziej intensywnego tarcia — jego temperatura jest wyższa niż tworzywa przepływającego przez przewężkę o większym przekroju poprzecznym [4, 20]. Tak więc, stosując korekty przewężek można uzyskać równoczesne wypełnianie gniazd formujących, ale tworzywem o odmiennych właściwościach, co powoduje następne zróżnicowanie struktury i właściwości wyprasek wtryskowych [21]. Takie rozwiązanie nie zapewnia zatem możliwości uzyskiwania wyprasek precyzyjnych.

W formach wielogniazdowych z układem kanałów doprowadzających o różnej długości lecz z jednakowymi przewężkami jest wprawdzie możliwe uzyskanie wyprasek o dużej dokładności, ale niezbędny jest wówczas specjalny dobór warunków wtryskiwania, których przedział powinien być bardzo wąski w stosunku do ogólnie przyjmowanego. Zagadnienie to oraz zasady ustalania warunków wtryskiwania w takim przypadku

zostały szczegółowo przedstawione w pracach R. Sikory i J. Kłoca [22—25]. W badaniach procesu wytwarzania wyprasek z polietylenu dużej gęstości, z zastosowaniem formy dwudziestogniazdowej z układem gniazd pokazanym na rysunku 4a, autorzy ci wykazali, że długość drogi przepływu tworzywa do poszczególnych gniazd wpływa na skurcz i masę [22, 25] oraz na dokładność wymiarów [23, 24] wyprasek otrzymanych z różnych gniazd. Przykłady wyników badania przez nich wpływu temperatury wtryskiwania na skurcz i masę wyprasek z gniazd formujących położonych w różnej odległości od miejsca wtryskiwania przedstawiono na rys. 4b oraz 4c.

WTRYSKARKA

Wtryskarki precyzyjne muszą charakteryzować się dokładnym prowadzeniem podzespołów formy w fazie jej zamykania, możliwością regulowania i kontrolowania warunków wtryskiwania w bardzo wąskim przedziale oraz doskonałym stanem technicznym. Ważne jest zwłaszcza zapewnienie określonej temperatury i objętości wtryskiwanego tworzywa, prędkości wtryskiwania oraz szybkiego i powtarzalnego przełączania ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku. Wtryskarki muszą mieć możliwość sterowania nastawianymi wielkościami

w pętli zamkniętej. Ze względu na większą dokładność i powtarzalność bardziej odpowiednie są wtryskarki z napędem elektrycznym, zwane wtryskarkami elektrycznymi [26]. Ważne jest środowisko, w którym przebiega proces wtryskiwania — wypraski o tolerancji wymiarów rzędu mikrometrów należy wytwarzać w czystym środowisku, o kontrolowanej temperaturze i wilgotności, najlepiej przy użyciu wtryskarek wyposażonych w komory czystego powietrza. Stanowisko do wtryskiwania precyzyjnego obejmuje ponadto urządzenia do automatycznego przenoszenia wyprasek podczas procesu i po jego zakończeniu, na przykład podczas pomiarów kontrolnych, pakowania itp., a także, jeżeli jest to wskazane, urządzenia do suszenia i odgazowania granulatu.

T a b e l a 1. Dopuszczalne wartości zmienności warunków wtryskiwania w odniesieniu do wtryskarek o różnej dokładności działania [6]

T a b l e 1. Acceptable variability of molding conditions for injection molding machines of different accuracies [6]

Parametr wtryskiwania	Klasa 9. (najmniejsza dokładność)	Klasa 1. (największa dokładność)
Temperatura wtryskiwania, °C	± 5	± 1
Temperatura formy, °C	± 8	± 2
Czas wtrysku, s	± 0,17	± 0,04
Ciśnienie docisku, MPa	± 0,5	± 0,1
Czas docisku, s	± 0,02	± 0,009
Czas ochładzania, s	± 0,86	± 0,20

Pod względem dokładności działania wtryskarki dzieli się na dziewięć klas [6, 26], w zależności od zakresu zmienności nastawianych warunków wtryskiwania. W tabeli 1 porównano maksymalne dopuszczalne wartości zmienności podstawowych warunków wtryskiwania w przypadku wtryskarek klasy 9. (o najmniejszej dokładności działania) oraz klasy 1. (o największej dokładności). Do procesu wtryskiwania precyzyjnego należy stosować oczywiście wtryskarki o możliwie największej dokładności działania.

Podczas wtryskiwania precyzyjnego często stosuje się odgazowanie przetwarzanego tworzywa [3]. Odgazowanie takie może odbywać się bądź w formie wtryskowej, bądź w układzie uplastyczniającym wtryskarki. Do wtryskiwania z odgazowaniem w formie stosuje się wtryskarki z układem uplastyczniającym wyposażonym w ślimak o stałej objętości kanału. Ten sposób odgazowania powoduje jednak przedłużenie fazy wtrysku, co zmniejsza wydajność procesu wtryskiwania, a ponadto niekiedy nie jest wystarczająco skuteczny. Stąd też częściej występuje wtryskiwanie z odgazowaniem tworzywa w układzie uplastyczniającym. Stosuje się wówczas ślimaki z deredukcją (lub deredukcjami) objętości kanału. Długość części ślimaka z deredukcją kanału (strefy odgazowania) powinna odpowiadać całkowite-

mu skokowi ślimaka. Ciśnienie powstających w temperaturze przetwórstwa części lotnych jest wystarczająco duże do tego, aby nie było konieczne wytwarzanie podciśnienia w otworze odgazującym cylindra układu uplastyczniającego.

METODA WTRYSKIWANIA

Wypraski precyzyjne można wytwarzać różnymi metodami wtryskiwania. Oprócz procesu konwencjonalnego, najczęściej wykorzystuje się metodę wtryskiwania z doprasowaniem, polegającą na zastosowaniu dodatkowego ściskania tworzywa w gnieździe poprzez ruch podzespołu formy [5, 27]. Proces ten składa się z dwóch etapów. Na pierwszym z nich, w fazie wtrysku, dokładnie określona porcja tworzywa zostaje wtrysnięta do niecałkowicie zamkniętej formy teleskopowej — wypełnienie gniazda formującego odbywa się w warunkach niewielkiego ciśnienia tworzywa w gnieździe. Po zakończeniu fazy wtrysku bądź jeszcze podczas jej trwania następuje przesunięcie podzespołu ruchomego formy i całkowite jej zamknięcie oraz ostateczne wypełnienie gniazda na drugim etapie, określanym jako doprasowanie. Doprasowanie przyczynia się do zwiększenia gęstości wypraski, nie powodując przy tym wzrostu stopnia orientacji makrocząsteczek. Dwójłomność optyczna takich wyprasek jest mniejsza niż wyprasek uzyskanych w procesie wtryskiwania konwencjonalnego [28]. Wypraski charakteryzują się bardzo dobrym odwzorowaniem powierzchni gniazda formującego, dokładnymi i stabilnymi wymiarami oraz małymi naprężeniami własnymi. Metodą tą wytwarza się często wypraski precyzyjne typu płyt kompaktowych oraz soczewek optycznych o dużej przejrzystości.

Inną metodą wtryskiwania stosowaną do wytwarzania wyprasek precyzyjnych jest wtryskiwanie wspomaganie gazem lub wodą, nazywane też wtryskiwaniem pustozącym [9]. W procesach tych do gniazda formującego formy wtryskowej, częściowo lub prawie całkowicie wypełnionego tworzywem ciekłym, wprowadza się gaz (najczęściej dwutlenek węgla) lub wodę pod dużym ciśnieniem, umożliwiającym przemieszczenie tworzywa w kierunku ścianek formy [5, 29, 30]. Bezpośrednio przed otwarciem formy i wyjęciem z niej wypraski, gaz lub woda zostaje usunięte z gniazda. Metodą tą uzyskuje się wypraski puste, dobrze odwzorowujące kształt gniazda formującego. Możliwe jest wytwarzanie wyprasek lekkich, sztywnych, bez pęcherzy i zapadnięć, nie wykazujących przy tym skłonności do samoistnego odkształcania się, a to ze względu na mniejsze naprężenia własne niż w wypraskach litych; charakteryzują się one też dobrą jakością powierzchni i małym skurczem.

Podobny efekt uzyskuje się stosując wtryskiwanie porujące lub mikroporujące [5, 9, 27, 31, 32]. W celu uzyskania wyprasek precyzyjnych, do tworzywa wtryskiwanego dodaje się tu niewielką ilość poroforu — taką, jaka umożliwi wytwarzanie wyprasek dobrze odwzo-

rowujących powierzchnię gniazda formującego, ale nie powoduje jednocześnie wyraźnego pogorszenia ich właściwości.

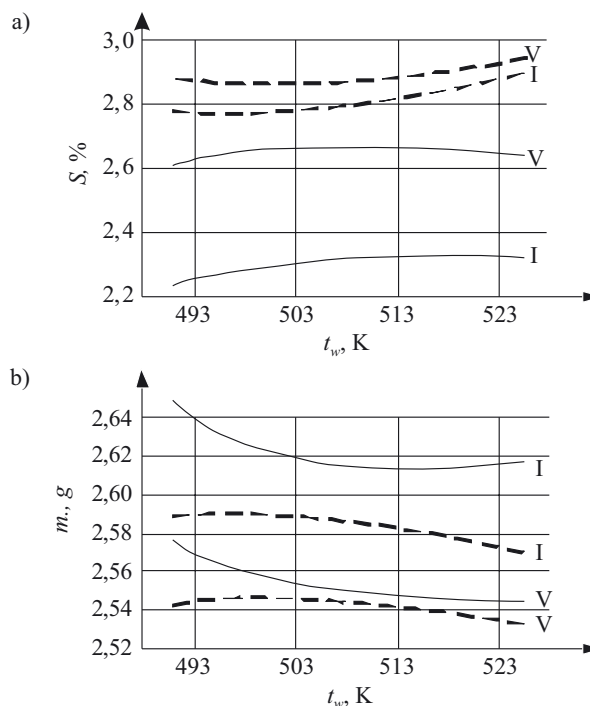
Wypraski precyzyjne wytwarza się również w procesach wtryskiwania dwuskładnikowego oraz otryskiwania wstawek zewnętrznych i wewnętrznych [5, 9, 27]. Zastosowanie wcześniej wytworzonych wstawek przyczynia się do zmniejszenia skurczu wyprasek i polepszenia stabilności ich wymiarów.

Metodę wtryskiwania precyzyjnego wykorzystuje się do otrzymywania elementów optycznych, które muszą charakteryzować się dużą dokładnością kształtu i wymiarów oraz małymi naprężeniami własnymi. Aby uzyskać takie wypraski tworzywo powinno wtryskiwać się do gniazda formującego pod małym ciśnieniem, co nie pozwala jednak na zachowanie dużej dokładności wyprasek. Autorzy pracy [33] zaproponowali metodę wytwarzania precyzyjnych soczewek optycznych, w której wykorzystuje się zjawisko skurczu tworzywa do kontrolowanej zmiany kształtu soczewki.

WARUNKI WTRYSKIWANIA

Warunki wtryskiwania w sposób istotny oddziałują na wiele cech wyprasek, a zwłaszcza na strukturę, właściwości użytkowe (np. mechaniczne lub cieplne), stan powierzchni, masę, skurcz, stan naprężeń oraz dokładność wymiarów wyprasek [2—5, 22—25, 34]. Aby uniknąć zróżnicowania wymienionych cech wyprasek w procesie wtryskiwania precyzyjnego, przedział zalecanych parametrów wtryskiwania danego tworzywa jest węższy niż ogólnie przyjmowany w literaturze bądź we wskazaniach producentów tworzyw. Wykazano [25], że w formach wielogniazdowych z szeregowym układem gniazd formujących, a więc z różną długością drogi przepływu tworzywa do poszczególnych gniazd, wpływ zmian warunków wtryskiwania na błąd wymiaru wyprasek nie jest jednakowy w odniesieniu do wszystkich gniazd. Zmiana warunków wtryskiwania w przypadku gniazd z najkrótszą drogą przepływu powoduje większy błąd masy i wymiaru wyprasek niż taka sama zmiana warunków w przypadku gniazd z najdłuższą drogą przepływu. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wyniki badań wpływu ciśnienia i temperatury wtryskiwania na skurcz pierwotny i masę wyprasek, wytworzonych w formie dwudziestogniazdowej (z układem gniazd jak na rys. 4), uzyskanych z gniazd położonych w najmniejszej (I) i największej (V) odległości od miejsca wtryskiwania. Wyraźnie są tu widoczne większe zmiany wartości S i m w zależności od zmian t_w i p_w w przypadku wyprasek otrzymanych z gniazda (I), jednak korzystnie charakteryzują się one przy tym mniejszymi wartościami skurczu.

Trudno jest ustalić ogólne warunki wtryskiwania precyzyjnego, gdyż jest to specyficzny proces wytwarzania każdej indywidualnej wypraski i jego parametry należy ustalać odrębnie w każdym konkretnym przypad-

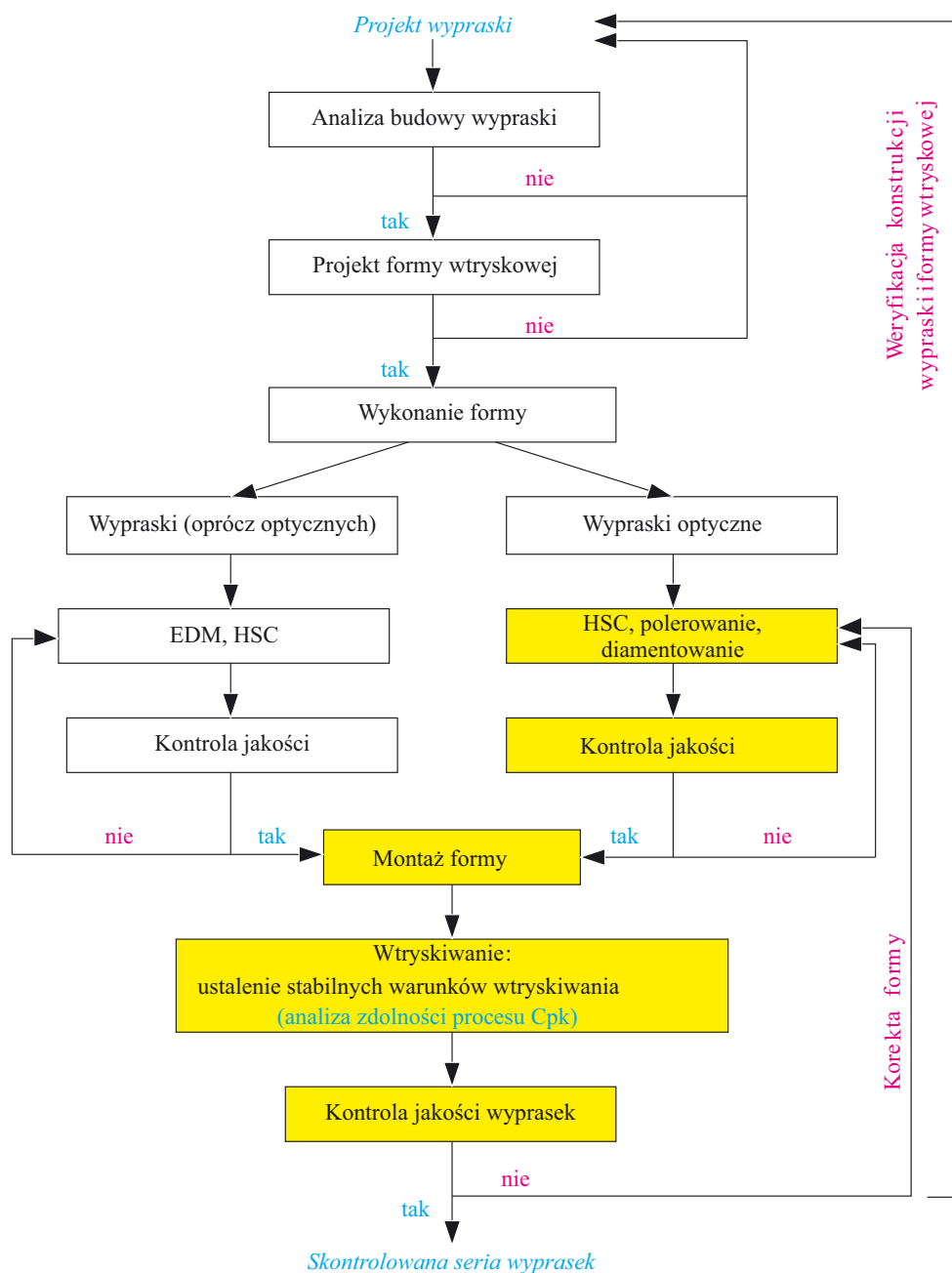


Rys. 5. Zależność skurczu pierwotnego poprzecznego S (a) i masy wyprasek m (b) od temperatury wtryskiwania t_w i ciśnienia wtryskiwania p_w , do formy o temp. 318 K (45 °C); oznaczenie gniazd formujących I oraz V zgodnie z rys. 4a (opracowane na podstawie pracy R. Sikory i J. Kloca [24]); — $p_w = 88,3$ MPa, ---- $p_w = 58,9$ MPa

Fig. 5. Dependence of primary crosswise shrinkage S (a) and molding weight m (b) on injection temperature (T_w) and injection pressure p_w , for mold temperature 318K. Denotations of cavities I and V according to Fig. 4a (based on the paper of R. Sikora and J. Kloc [24]). — $p_w = 88.3$ MPa, ---- $p_w = 58.9$ MPa

ku. Przebieg takiego procesu analizuje się z wykorzystaniem doświadczenia technologów, opracowując „inteligentne” strategie jego przebiegu oraz stosując statystyczne metody oszacowania wielkości charakterystycznych występujących w danym procesie. Niektóre istotne cechy materiałowe wyprasek precyzyjnych, na przykład skurcz, zależą nie tylko od rodzaju tworzywa wypraski, ale również od jej budowy oraz warunków wtryskiwania. W związku z tym zazwyczaj nie można ustalić dokładnych warunków wtryskiwania precyzyjnego bez odpowiednich prób technologicznych.

W publikacji R. Mayera [35] zaproponowano procedurę postępowania w opracowaniu procesu wytwarzania wyprasek precyzyjnych (rys. 6). Według tej procedury najpierw projektuje się i wykonuje formę wtryskową, bez uwzględniania skurczu wyprasek, a następnie przeprowadza się wtryskiwanie w szerokim przedziale jego parametrów, przy czym w każdym cyklu zmienia się (w możliwie najmniejszym stopniu) wartości nastawianych wielkości. Uzyskane wypraski kontroluje się i na tej podstawie koryguje kształt oraz wymiary formy wtrys-



Rys. 6. Procedura stosowana w niemieckiej firmie Viaoptic GmbH w procesie wytwarzania wyprasek precyzyjnych [35]; EDM — obróbka elektroerozyjna, HSC — szybkościowa obróbka skrawaniem
 Fig. 6. Course of the process of precise moldings' manufacturing. Procedure used in German company Viaoptic GmbH [35]. EDM — Electrical Discharge Machining, HSC — High Speed Cutting

kowej. Opisany sposób postępowania zapewnia dużą stabilność i dokładność procesu wytwarzania wyprasek precyzyjnych, ale do jego realizacji jest niezbędne stosowanie odpowiednich urządzeń pomiarowych, dobra narzędziownia oraz — w dziale projektowania wyprasek i narzędzi — wysoko wykwalifikowani inżynierowie.

WTRYSKIWANE TWORZYWO

Na wybór tworzywa do wtryskiwania precyzyjnego mają wpływ jego właściwości reologiczne i przetwórcze oraz te, które charakteryzują użytkową przydatność wy-

prasek. Jedną z podstawowych właściwości decydujących o możliwości zastosowania tworzywa do wytwarzania wyprasek precyzyjnych jest skurcz. Wiadomo, że tworzywa bezpostaciowe mają mniejszy skurcz (0,3—0,8 %) niż częściowo krystaliczne (1—3 %), a więc są materiałami bardziej odpowiednimi do wtryskiwania precyzyjnego. Jednak nie wyklucza się stosowania również tworzyw częściowo krystalicznych, z tym, że należy wówczas przewidzieć problemy wynikające z ich skurczu.

Skurcz a także stabilność wymiarów wyprasek można polepszyć dzięki wprowadzeniu do polimeru napeł-

niaczy nieorganicznych. Ponadto, większą stabilność wymiarów mają tworzywa o wysokiej temperaturze zeszklenia, wyższej od temperatury użytkowania wyprasek. Zatem tworzywa na podstawie polimerów bezpostaciowych zawierające napełniacze nieorganiczne i odznaczające się wysoką temperaturą zeszklenia zapewniają największą stabilność wymiarów wyprasek. Wybierając tworzywo należy ponadto uwzględnić warunki, w jakich będą użytkowane wypraski — na przykład wilgotność środowiska, temperaturę (jej wartość oraz zmienność w czasie), stan obciążenia oraz specjalne wymagania dotyczące cech niektórych typów wyprasek, np. optycznych. Polimerem często stosowanym do wytwarzania wyprasek precyzyjnych jest poliwęglan.

PODSUMOWANIE

Wtryskiwanie tworzyw polimerowych może być efektywną metodą masowego wytwarzania wyprasek precyzyjnych. Wysokie wymagania stawiane takim wypraskom wiążą się z określonymi wymogami dotyczącymi wszystkich etapów ich wytwarzania — projektowania wypraski, wyboru tworzywa, projektowania, wykonania i montażu formy wtryskowej, wyboru wtryskarki i urządzeń uzupełniających oraz ustalania warunków procesu przetwórstwa. Bardzo istotne jest monitorowanie i sterowanie całego cyklu procesu wtryskiwania, z wykorzystaniem najnowszych dostępnych technologii w tej dziedzinie. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że podstawowe zjawiska (głównie przepływ ciekłego tworzywa, zmiany stanu skupienia, orientacja makrocząsteczek, proces krystalizacji), decydujące o jakości wyprasek, zachodzą w zamkniętej formie wtryskowej, co znacznie utrudnia, a często nawet uniemożliwia obserwację i ewentualne sterowanie ich przebiegiem. Z tego względu jest korzystne, oprócz prowadzenia badań eksperymentalnych, zastosowanie symulacji komputerowych do analizy procesu wtryskiwania i jego wpływu na jakość wyprasek. Ważne są również możliwości wykorzystania opisów matematycznych, na przykład zjawisk reologicznych, cieplnych bądź stanu obciążenia, do przewidywania jakości wyprasek, głównie wartości ich skurczu, odkształceń powtryskowych, stanu naprężeń własnych i stopnia krystaliczności.

LITERATURA

- Bociąga E., Jaruga T.: *Polimery* 2009, **54**, 342.
- Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001.
- Osswald T. A., Turng L-S., Gramann P. J.: „Injection Molding Handbook”, Hanser Publishers, Munich, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati 2001.
- Greener J., Wimberger-Friedl R.: „Precision Injection Molding”, Hanser Publishers, Munich 2006.
- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”. Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992.
- Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT, Warszawa 1984.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw polimerowych. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
- Bociąga E.: *Narzędziowiec* 2005, nr 4, 46.
- Dybała B., Frankiewicz M.: *TS Raport* 2006, nr 41, 34.
- Bociąga E., Jaruga T., Pietrzak M.: *Zeszyty Naukowe Instytutu Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych „Metalchem”*, Toruń 2007, numer specjalny, 25.
- Polynkin A., Pittman J. F. T., Sienz J.: 21st Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Leipzig 2005, mat. konf., str. 2—11.
- Bociąga E., Jaruga T.: *Polimery* 2006, **51**, 843.
- Bociąga E., Jaruga T., Sterzyński T., Banasiak A.: 21st Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Leipzig 2005, mat. konf., str. 1—11.
- Bociąga E., Jaruga T.: *Arch. Mater. Sci. Eng.* 2007, **28**, 165.
- Jaruga T., Bociąga E.: *Arch. Mater. Sci. Eng.* 2007, **28**, 429.
- Beaumont J. P.: „Runner and Gating Design Handbook”, Hanser Publishers, Munich 2004.
- Sikora R., Bociąga E.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2003, nr 3, 91.
- Bociąga E.: *Polimery* 2002, **47**, 122.
- Bociąga E.: *Polimery* 2000, **45**, 89.
- Sikora R., Kloc J.: *Kunststoffe* 1982, **72**, 449 (*Kunststoffe German Plast.* 1982, **72**, 4).
- Sikora R., Kloc J.: *Przegląd Mech.* 1982, **15**, 19.
- Sikora R.: *Plast. Massy* 1983, nr 7, 48.
- Sikora R., Kloc J.: „*Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń*” 1984, nr 2, 9.
- Jachowicz T.: *Polimery* 2007, **52**, 99.
- Bociąga E.: „Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych”. WNT, Warszawa 2008.
- Liu S. J., Lin K. Y.: The Polymer Processing Society Europe-Africa Meeting, Athens 2003, mat. konf. 209-A2-P.
- Bociąga E.: *Polimery* 2005, **50**, 10.
- Bociąga E.: *Polimery* 2007, **52**, 88.
- Bociąga E.: „Wtryskiwanie mikroporujące (MuCell)” w pracy zbiorowej „Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych” (red. Koszul J., Bociąga E.), Częstochowskie Wydawnictwo Archidiec. Regina Poloniae, Częstochowa 2006, 36.
- Błędzki A. K., Faruk O., Kirschling H., Kühn J., Jaszkiwicz A.: *Polimery* 2006, **51**, 697.
- Ueda K., Watanabe J., Sawada K., Sugimoto Y., Yamanaka T., Koseko H.: 22nd Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Yamagata 2006, mat. konf. G08.23
- Postawa P.: *Polimery* 2005, **50**, 201.
- Mayer R.: „Precision Injection Molding. How to Make Polymer Optics for High Volume and High Precision Applications”, www.optic-photonik.de