

ELŻBIETA BOCIĄGA

Politechnika Częstochowska
Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją
Al. Armii Krajowej 19c
42-200 Częstochowa

Wytwarzanie wyprasek wtryskowych o specyficznych cechach geometrycznych^{*)}

Streszczenie — Na podstawie danych literaturowych scharakteryzowano metody mikrowtryskiwania oraz wytwarzania wyprasek cienkościennych. W odniesieniu do każdej z nich omówiono warunki poszczególnych etapów procesu technologicznego, a także wymagania dotyczące wtryskarek, form oraz wykorzystywanych tworzyw polimerowych. Zestawiono też wady i zalety przedstawionych metod przetwórczych w porównaniu z konwencjonalnym wtryskiwaniem. Podano możliwe zastosowania mikrowyprasek i wyprasek cienkościennych.

Słowa kluczowe: mikrowtryskiwanie, wypraski cienkościenne, warunki procesowe, wtryskarki, formy wtryskowe.

INJECTION MOLDING OF PARTS OF SPECIFIC GEOMETRICAL FEATURES

Summary — On the basis of literature data the methods of microinjection molding and thin-wall injection molding were characterized. The conditions of particular steps of these processes as well as the requirements for injection molding machines, molds and polymers used were discussed. The advantages and disadvantages of both processing methods in comparison with conventional injection molding were compiled. Possible applications of microparts and thin-wall moldings were given.

Key words: microinjection molding, thin-wall moldings, process conditions, injection molding machines, injection molds.

Metodę wtryskiwania wykorzystuje się powszechnie do przetwórstwa tworzyw polimerowych — zarówno termoplastycznych, jak i utwardzalnych. Wtryskiwać można kompozyty i mieszaniny polimerowe, a także inne materiały zawierające spoiwo polimerowe, takie jak proszki metalowe i ceramiczne. Technologię wtryskiwania konwencjonalnego stosunkowo dobrze poznano i opisano w literaturze [1—3]. Ciągłe jednak prowadzi się badania nad wprowadzeniem nowych technik wtryskiwania, pozwalających na poszerzenie zakresu stosowania wyprasek wtryskowych, zwiększenie wydajności ich produkcji bądź wytwarzanie wyprasek o właściwościach specjalnych. Ten ostatni kierunek dotyczy, na przykład, wyprasek o polepszonej wytrzymałości mechanicznej lub spełniających specyficzne wymagania odnoszące się do ich kształtów geometrycznych albo jakości [4—9].

Do wyprasek o specjalnych cechach geometrycznych zalicza się przede wszystkim wytwory o bardzo małych wymiarach, tzw. mikrowypraski, oraz wytwory o ścian-

kach bardzo cienkich w stosunku do pozostałych wymiarów. Wytwarza się je prowadząc proces wtryskiwania w nietypowy sposób. Przepływ ciekłego materiału odbywa się tu bowiem w kanałach i gniazdach formujących o niewielkich przekrojach poprzecznych, co powoduje występowanie dużych oporów a ponadto intensywne ochładzanie tworzywa. Zatem budowa i warunki działania wtryskarki, urządzeń pomocniczych oraz formy wtryskowej muszą być tak dobrane, aby nie dochodziło do zestalania tworzywa podczas fazy wypełniania gniazd formujących.

MIKROWTRYSKIWANIE

Jak już wspomniano, w procesie mikrowtryskiwania wytwarza się wypraski, których nie można otrzymać w wyniku konwencjonalnego wtryskiwania ze względu na bardzo małe wymiary bądź wymagania odnoszące się do ich cech użytkowych i tolerancji wymiarowej. Stosuje się przy tym wtryskarki oraz urządzenia pomocnicze o specjalnej konstrukcji, umożliwiające dokładne dozowanie bardzo małych porcji tworzywa, wypychanie i usuwanie mikrowyprasek z formy, kontrolę ich jakości, oddzielanie wyprasek od odpadu, a także precyzyjne odbieranie i pakowanie wytworów.

^{*)} Artykuł zawiera treść wystąpienia przedstawionego w ramach XII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Toruń-Bachotek, 4—6 czerwca 2007 r.

Uzyskiwane na drodze mikrowtyskiwania wyroby to [3, 10–12]:

— wypraski o ciężarze od kilku miligramów do dziesiątych części grama i wymiarach nawet rzędu mikrometrów, np. mikrokoła zębate, mikrokołki sterujące;

— wypraski o wymiarach konwencjonalnych, ale z obszarami o specjalnej mikrostrukturze lub charakteryzujące się specyficznymi cechami użytkowymi, np. płyty kompaktowe z zagłębieniami będące nośnikiem informacji bądź soczewki optyczne z mikrowarstwą zewnętrzną o cechach specyficznych;

— wypraski precyzyjne o dowolnych wymiarach, ale z tolerancją rzędu mikrometrów, np. złącza do włókien światłowodowych.

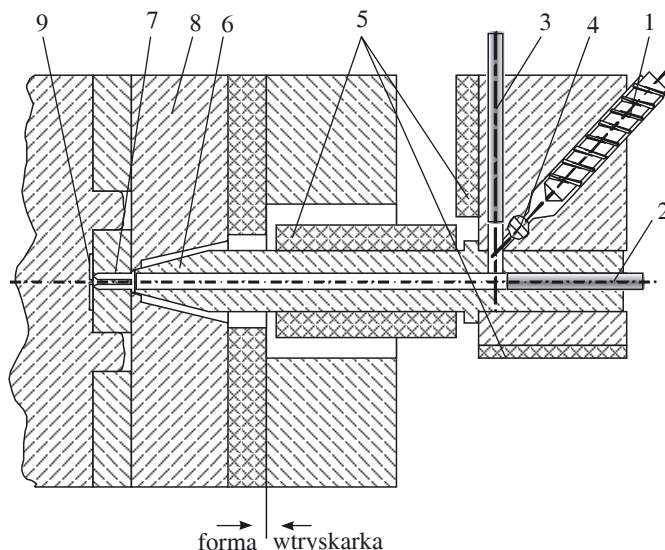
Charakterystyka wtyskarek i przebiegu procesu mikrowtyskiwania

Wtyskarki wykorzystywane w procesie mikrowtyskiwania są wyposażone w małe układy uplastyczniające, ze ślimakiem średnicy 12–18 mm i mniejszej niż konwencjonalna długości ($L/D \approx 15$) (co zapobiega degradacji tworzywa mającej miejsce podczas dłuższego oddziaływania wysokiej temperatury na materiał) oraz zamykaną dyszę wtyskową [3, 10–21]. Stosowanie ślimaków z mniejszą średnicą nie jest uzasadnione ze względu na ich ograniczoną wówczas wytrzymałość.

W doborze rodzaju urządzeń należy ponadto uwzględnić uwarunkowania związane z wymiarami granulek tworzywa. Najczęściej ich długość i średnica wynoszą ok. 3 mm, głębokość zaś kanału ślimaka zapewniająca prawidłowe pobieranie tworzywa z zasobnika zazwyczaj przekracza 3,5 mm. Zastosowanie zatem układów uplastyczniających ze ślimakami o zmniejszonej średnicy i ograniczonej objętości wtysku byłoby możliwe jedynie w przypadku granulek tworzywa o mniejszych wymiarach. Wykorzystywane do mikrowtyskiwania wtyskarki muszą mieć mechanizmy dokładnego sterowania objętością wtysku i prędkością wtyskiwania oraz kontroli czasu przełączania ciśnienia wtysku na ciśnienie docisku, a także możliwość doprowadzania temperatury formy do wartości (czasami niewiele wyższej od temperatury topnienia materiału), w której nie następuje przedwczesne zestalenie tworzywa w ultracienkich warstwach.

Wtyskarki takie powinny gwarantować dokładne osiowanie podzespołów formy oraz łagodne jej zamykanie i otwieranie. Dlatego też stosuje się w nich mikroprocesorowe sterowanie określonymi czynnościami, zapewniające czas reakcji od 0,1 ms do 1 ms oraz przedział objętości wtyskiwanego tworzywa mieszczący się w granicach $0,01$ – $0,1 \text{ cm}^3$.

We wtyskarkach firmy Boy sterowanie mikroprocesorowe wzbogacono o funkcję tzw. komparatorów sprzętowych [21]. Komparator jest dodatkowym elementem umożliwiającym porównanie sygnałów napięcia wytwarzanych przez czujniki położenia lub czujniki ciśnie-

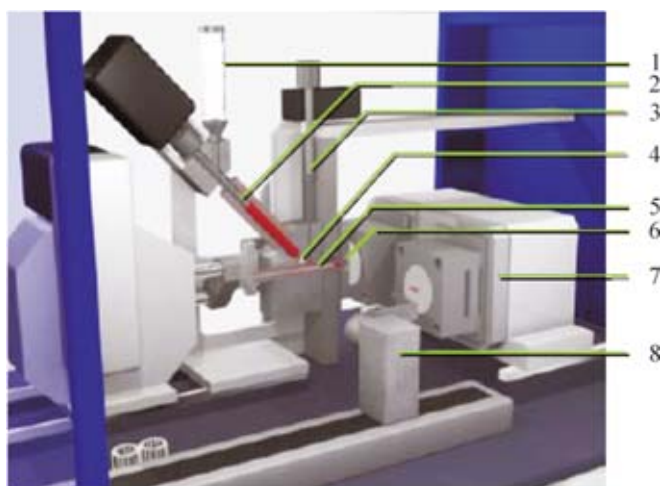


Rys. 1. Schemat mikrowtyskarki: 1 — ślimakowy układ uplastyczniający, 2 — tłokowy układ wtyskowy, 3 — tłok dozujący, 4 — zawór odcinający, 5 — grzejniki, 6 — dysza wtyskowa, 7 — tuleja wtyskowa, 8 — forma wtyskowa, 9 — wypraska [15, 16, 20]

Fig. 1. Scheme of microinjection molding machine: 1 — screw plasticating unit, 2 — plunger injection unit, 3 — metering plunger, 4 — shut-off valve, 5 — heaters, 6 — injection nozzle, 7 — sprue, 8 — mold, 9 — molding [15, 16, 20]

nia z napięciem zadawanym przy sterowaniu. Komparator działa niezależnie od mikroprocesora i nie jest uwarunkowany aktualnym obciążeniem układu. Sterowanie mikroprocesorowe przy użyciu komparatora pozwala na uzyskanie każdorazowo czasu reakcji wynoszącego $0,1 \text{ ms}$ oraz rozrzutu objętości tworzywa $0,01 \text{ cm}^3$.

Mikrowtyskarki są często wyposażone w dwa układy uplastyczniające: ślimakowy do uplastyczniania tworzywa oraz tłokowy do dokładnego dozowania i wtyskiwania określonej jego porcji [10–12, 15–17] (rys. 1). Ślimakowy układ uplastyczniający (1) jest usytuowany pod kątem 45° w stosunku do tłokowego układu wtyskowego (2). Tworzywo uplastycznione w układzie ślimakowym jest podawane do komory dozującej. Tłok dozujący (3) przepycha odpowiednią — wstępnie ustaloną i kontrolowaną przez czujnik optyczny w komorze dozującej — porcję tworzywa do układu wtyskowego. Tłok wtyskowy małej średnicy (5 mm) wtyskuje uplastycznione tworzywo do formy (8). Prędkość wtyskiwania musi być na tyle duża, aby nie dochodziło do przedwczesnego zestalenia tworzywa w kanałach formy. Po zakończeniu fazy wtysku następuje faza docisku. Ciśnienie docisku uzyskuje się stosując nieznaczny (nieprzekraczający 1 mm) ruch powrotny tłoka wtyskowego. W celu zmniejszenia strat tworzywa dysza wtyskowa (6) jest wprowadzona w podzespół formy nieruchomy do płaszczyzny podziału. Mikrowtyskarki ulegają ochłodzeniu w formie w bardzo krótkim czasie ze



Rys. 2. Wtryskarka firmy Battenfeld „Mikrosystem 50”: 1 — zasobnik tworzywa, 2 — ślimakowy układ uplastyczniający, 3 — tłok dozujący, 4 — zawór odcinający, 5 — tłokowy układ wtryskowy, 6 — dysza wtryskowa, 7 — stół obrotowy z zamontowanymi dwiema formami wtryskowymi, 8 — optyczne urządzenie kontrolne [12, 17]

Fig. 2. Battenfeld „Mikrosystem 50” injection molding machine: 1 — hopper, 2 — screw plasticating unit, 3 — metering plunger, 4 — shut-off valve, 5 — plunger injection unit, 6 — injection nozzle, 7 — rotating moving platen with two molds mounted, 8 — optical control unit [12, 17]

względnie na duży stosunek pola ich powierzchni do objętości. Forma jest otwierana tuż po zakończeniu fazy docisku.

Najdłuższą część cyklu wtryskiwania stanowi czas wypychania wyprasek z formy oraz zabiegów w warunkach otwartej formy. Aby skrócić względny czas cyklu wtryskiwania można stosować dwie formy wtryskowe montowane na stole obrotowym [11, 12, 20]; podczas wtryskiwania tworzywa do jednej formy, z drugiej jest wypychana wypraska wytworzona w poprzednim cyklu wtryskiwania.

Wtryskarkę firmy Battenfeld „Mikrosystem 50” z obrotowym stołem przeznaczoną do wytwarzania mikrowyprasek o masie mniejszej od 0,1 g przedstawia rys. 2. Urządzenie to ma stabilny, zapewniający równoległe prowadzenie podzespołów układ zamykania i otwierania formy, wyposażony w bardzo czuły mechanizm chroniący ją przed zamknięciem w przypadku, gdyby wypraska pozostała w gnieździe formującym. W tłokowym układzie wtryskowym zastosowano napęd serwoelektryczny. Serwozawory o bardzo krótkim czasie przełączania (2,5 ms, prędkość wtryskiwania 8 m/s) umożliwiają dozowanie tworzywa z dokładnością do 1 mg [20].

Usuwanie i odbieranie mikrowyprasek z formy

W procesie mikrowtryskiwania ważnym zagadnieniem jest specjalny sposób usuwania mikrowyprasek

z formy, a także przekazywanie ich do kontroli jakości i pakowania. Ze względu na bardzo małe wymiary oraz ciężar, wypraski wypchnięte z gniazd formujących nie spadają wprost do pojemników lub na taśmy przenośników, nie mogą być również odbierane przez konwencjonalne urządzenia odbierające. Do tego celu stosuje się więc urządzenie działające z wykorzystaniem obniżonego ciśnienia, sił elektrostatycznych lub nadmuchu. Nadmuch zjonizowanego powietrza skierowany na wypraski zmniejsza ładunek elektrostatyczny na ich powierzchni, dzięki czemu łatwiej je usunąć z formy. Dodatkowo można stosować filtry oczyszczające powietrze wokół formy wtryskowej. Proces wytwarzania wyjątkowo małych wyprasek musi być realizowany nawet z zastosowaniem wtryskarek wyposażonych w komory czystego powietrza. Rysunek 3 pokazuje wtryskarkę firmy Boy spełniającą takie wymagania.



Rys. 3. Wtryskarka firmy Boy do wytwarzania mikrowyprasek wyposażona w komorę czystego powietrza [18]

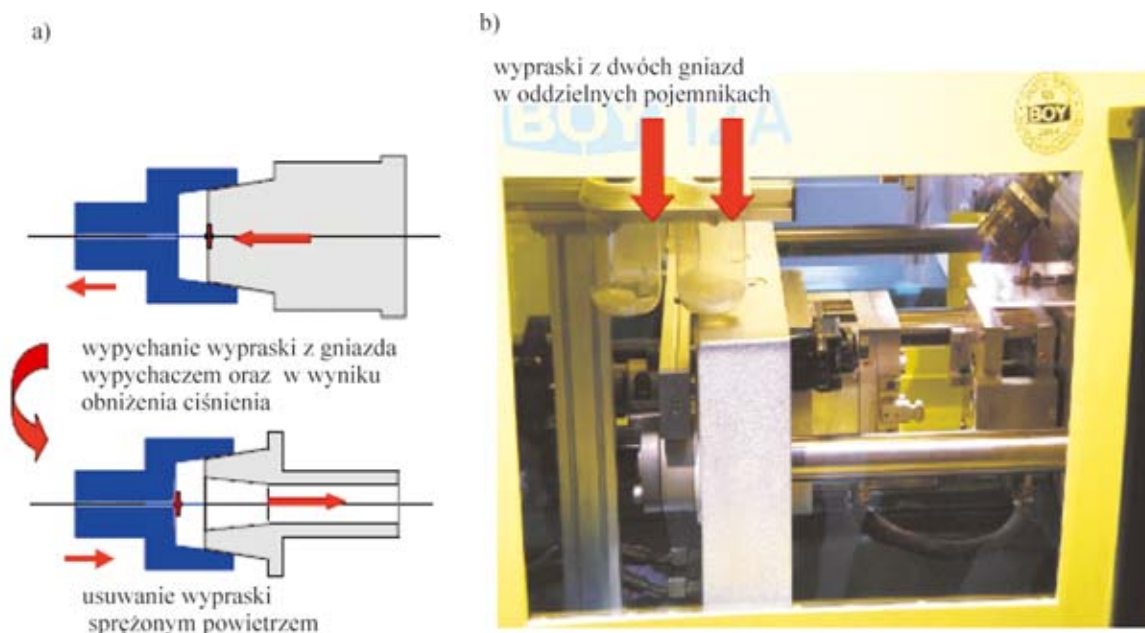
Fig. 3. Boy microinjection molding machine equipped with clean air box [18]

W przypadku form z zimnymi kanałami, wypraski można usuwać za pomocą robota chwytającego elementy zestalone w kanałach przepływowych.

Inny jeszcze sposób usuwania wyprasek z formy przedstawiono na rys. 4 — po jej otwarciu wypraski są wypychane z gniazd formujących za pomocą wypychacza oraz dodatkowo pod wpływem działania obniżonego ciśnienia, a następnie — usuwane z wykorzystaniem sprężonego powietrza.

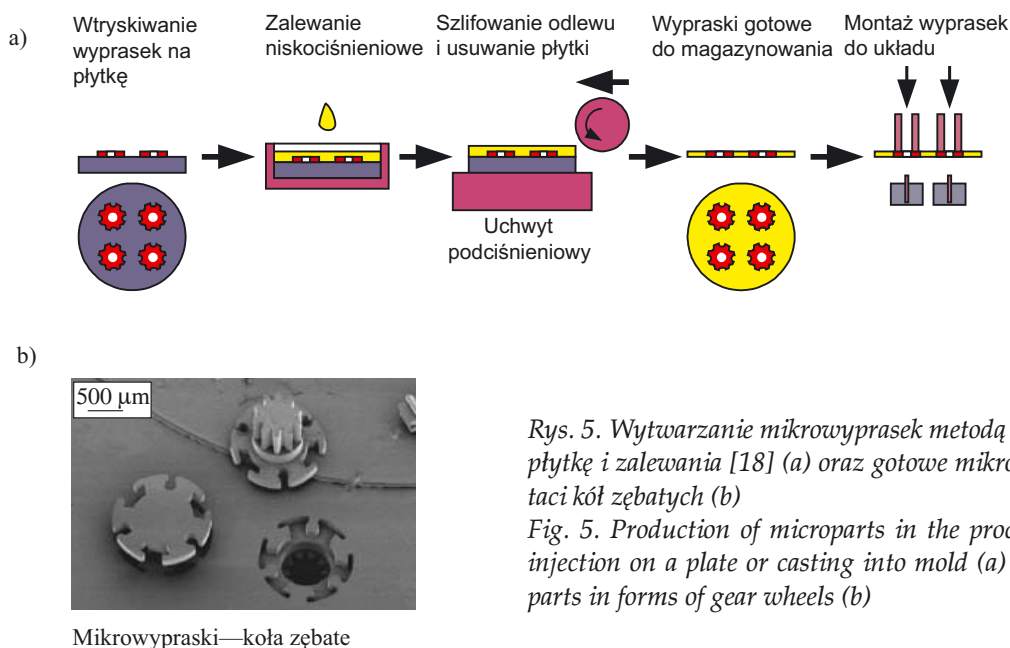
Do sprawdzania jakości wytworów stosuje się systemy kontroli wizyjnej.

Mikrowypraski funkcjonują zazwyczaj jako część jakiegoś układu, powinny być zatem pakowane w specjalny sposób przygotowujący je do montażu z innymi elementami. Stosuje się opakowania konturowe w postaci taśmy nawijanej na szpule. Taśma taka zabezpiecza wy-



Rys. 4. Sposób usuwania wyprasek z formy przy użyciu obniżonego ciśnienia i sprężonego powietrza (a) oraz widok formy wtryskowej do wytwarzania dwóch rodzajów wyprasek w jednym cyklu wtryskiwania (b) [18]

Fig. 4. Method of parts' removal from the mold by negative pressure or compressed air (a) and view of injection mold for manufacturing of two types of parts in one injection cycle (b) [18]



Rys. 5. Wytwarzanie mikrowyprasek metodą wtryskiwania na płytkę i zalewania [18] (a) oraz gotowe mikrowypraski w postaci kół zębatach (b)

Fig. 5. Production of microparts in the processes of polymer injection on a plate or casting into mold (a) [18], and microparts in forms of gear wheels (b)

praski przed zniszczeniem i ułatwia ich podawanie podczas montażu.

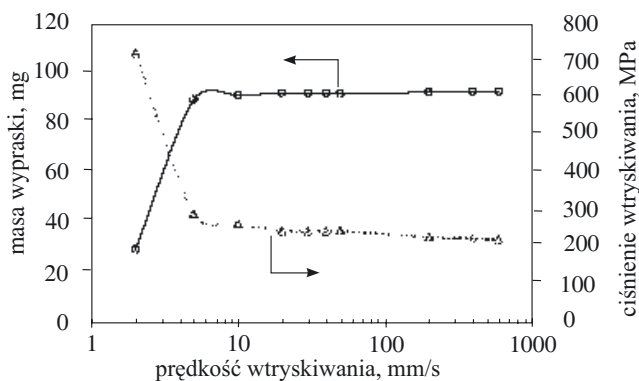
Inną techniką wytwarzania, pakowania i magazynowania mikrowyprasek (np. kół zębatach) jest połączenie procesu wtryskiwania z zalewaniem (rys. 5). Na pierwszym etapie wytwarza się wypraski metodą wtryskiwania tworzywa na płytkę, która jest następnie zalewana specjalną masą zalewową. Kolejny etap stanowi szlifowanie powierzchni odlewu do grubości równej wysokości wyprasek oraz usuwanie płytki. Tak przygotowane wypraski łatwiej przekazywać zarówno do magazynu-

nowania, jak i do montażu w wyniku ich wypchnięcia z odlewu i wciśnięcia do układu konstrukcyjnego. Taki przebieg procesu wytwarzania i montażu jest jednak pracochłonny, składa się z wielu operacji, a ponadto może być wykorzystany jedynie w odniesieniu do wyprasek płaskich.

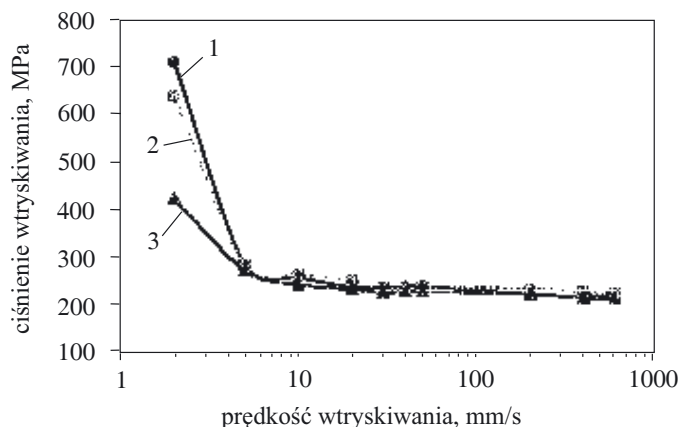
Warunki mikrowtryskiwania

Bardzo mała ilość tworzywa wtryskiwanego do gniazd formujących w omawianym procesie ulega szyb-

kiemu ochłodzeniu. Szybkość ta zależy przede wszystkim od właściwości tworzywa, temperatury wtryskiwania oraz temperatury formy a także od prędkości wtryskiwania. Zbyt szybkie zestalenie się materiału może być przyczyną niecałkowitego wypełnienia gniazd formujących oraz dużego skurczu i zapadnięć na powierzchni wyprasek, związanych również z brakiem fazy docisku. W celu zapewnienia prawidłowego wypełnienia gniazda formującego, proces prowadzi się z zastosowaniem dużej prędkości i jednocześnie bardzo wysokiego ciśnienia wtryskiwania oraz najwyższej dopuszczalnej temperatury przetwarzanego tworzywa. Rysunek 6, na przykładzie soczewek z poliwęglanu, pokazuje wpływ prędkości na ciśnienie wtryskiwania oraz na masę mikrowyprasek, rys. 7 natomiast ilustruje zależność pomiędzy ciśnieniem wtryskiwania a jego prędkością w warunkach różnej temperatury formy. W zakresie niewielkich wartości prędkości wtryskiwania uzyskiwane wypraski



Rys. 6. Wpływ prędkości wtryskiwania na ciśnienie wtryskiwania oraz na masę wyprasek (soczewki z poliwęglanu) [22]
 Fig. 6. Effects of injection speed on injection pressure and part weight (lens made of polycarbonate) [22]



Rys. 7. Zależność pomiędzy ciśnieniem a prędkością wtryskiwania w warunkach różnej temperatury formy [22]: 1 — 130 °C, 2 — 140 °C, 3 — 150 °C
 Fig. 7. Relationship between injection pressure and injection speed at different mold temperature [22]: 1 — 130 °C, 2 — 140 °C, 3 — 150 °C

mają więc bardzo małą masę (por. rys. 6), co wskazuje na zestalenie się tworzywa już w kanałach doprowadzających. Po osiągnięciu określonej prędkości wtryskiwania (ok. 10 mm/s) masa wypraski pozostaje już na niemal stałym poziomie. Można także zauważyć, że początkowo wzrostowi prędkości wtryskiwania towarzyszy gwałtowne zmniejszanie się ciśnienia wtryskiwania, natomiast większa wartość prędkości nie powoduje już istotnych zmian ciśnienia.

Przebieg krzywych na rys. 7 również wskazuje na niewielki — w zakresie dużych wartości — wpływ prędkości wtryskiwania na spadek ciśnienia. Natomiast w warunkach niedużej prędkości wtryskiwania i niskiej temperatury formy (130 °C), czemu towarzyszy olbrzymia wartość ciśnienia (700 MPa), tworzywo ochładza się bardzo szybko i może nawet ulec zestaleniu przed całkowitym wypełnieniem gniazda formującego. Powoduje to znaczny wzrost ciśnienia wewnątrz tworzywa i duże naprężenie w wypraskach, co zmusza do podwyższenia temperatury formy.

Formy wtryskowe

Prawidłowy przebieg procesu mikrowtryskiwania zależy w istotnym stopniu od formy wtryskowej, która musi spełniać określone wymagania dotyczące budowy oraz warunków działania; najważniejsze z nich to [9, 15, 23, 24]:

- duża gładkość powierzchni gniazd formujących i kanałów przepływowych oraz względnie mały kąt pochylenia ścianek, co zapewnia łatwe usuwanie wyprasek z formy;
 - dobre odpowietrzenie gniazd formujących, przy czym ustalając szerokość szczelin odpowietrzających należy uwzględnić bardzo małe wymiary wyprasek;
 - stosunkowo duże wymiary centralnego kanału wlewowego oraz kanałów doprowadzających umożliwiające kontrolę procesu podczas przepływu tworzywa w kanałach formy i uniknięcie jego degradacji;
 - małe przekroje poprzeczne przewęzek warunkujące łatwość oddzielania wyprasek od odpadu, jednak na tyle duże aby nie wystąpiło zjawisko strumieniowego wypełnienia gniazd formujących lub powstawania pułapek powietrznych;
 - stabilność kształtu i wymiarów gniazd formujących podczas kolejnych cykli wtryskiwania (wykonywanie form z odpowiednio dobranych materiałów konstrukcyjnych);
 - precyzyjne prowadzenie podzespołów formy;
 - automatyczne oddzielanie wyprasek od odpadu, odbieranie wyprasek i odpadu za pomocą robotów.
- Formy do mikrowtryskiwania muszą mieć specjalne układy nagrzewania i chłodzenia, zapewniające odpowiednią ich temperaturę podczas fazy wypełnienia gniazda formującego i ochładzania wypraski. Jak już wspomniano, ze względu na bardzo małe wymiary wyprasek i ich szybkie chłodzenie, temperatura formy

w fazie wypełniania gniazd formujących musi być na tyle wysoka, by gniazda mogły się wypełnić całkowicie. Z kolei, w fazie wypychania, wypraski muszą mieć temperaturę na tyle niską, aby nie nastąpiło ich mechaniczne odkształcenie i uszkodzenie. W związku z tym, w toku cyklu wtryskiwania stosuje się zmienną temperaturę formy. Do tego celu służą dwa układy chłodzenia/grzania, mianowicie wewnętrzny (olejowy lub wodny) oraz zewnętrzny (nagrzewanie płomieniowe, radiacyjne bądź indukcyjne) [25–28].

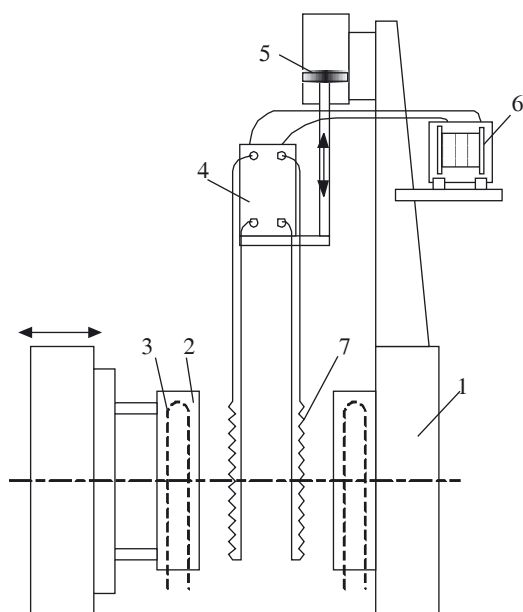
Na pierwszym etapie procesu, przed fazą wtrysku, podzespoły formy są wstępnie nagrzewane, po czym, po zamknięciu i wypełnieniu gniazd formujących, ochładzane do temperatury, w której wypraski mogą zostać usunięte z formy. Schemat układów nagrzewania i chłodzenia formy do mikrowtryskiwania ilustruje rys. 8. Dwa induktory wprowadza się pomiędzy otwarte podzespoły formy. Po nagraniu jej do ustalonej temperatury ogrzewanie jest wyłączane, a induktory usuwa się za pomocą robota. Po zamknięciu formy włącza się ochładzanie olejowe i następuje zestalanie tworzywa.

Omawiane formy wykonuje się metodami litografii rentgenowskiej, obróbki galwanicznej (trawienia), mi-

krociecia, precyzyjnej obróbki skrawaniem, obróbki laserowej albo mikrodrażenia elektroerozyjnego [9, 11, 12, 15, 25]. W niektórych przypadkach łączy się kilka metod.

Tworzywa

Metodą mikrowtryskiwania można przetwarzać prawie wszystkie materiały polimerowe stosowane w konwencjonalnym procesie, jednak dogodniejsze są odmiany nienapełnione, o małej lepkości, tworzywa zaś charakteryzujące się dużą lepkością, np. PTFE, nie są używane do wytwarzania mikrowyprasek. Najczęściej uzyskuje się wypraski z poliacetali (POM), PC, PMMA, PA, PS, PP, polimerów ciekłokrystalicznych, polieteroimidu i kauczuków silikonowych [3, 15, 22, 29]. Podejmuje się również próby wykorzystania tworzyw zawierających nanonapełniacze [30]. Mikrowtryskiwanie materiałów utwardzalnych stwarza pewne problemy ze względu na długi czas utwardzania, ale jest możliwe z zastosowaniem do sieciowania polimeru promieniowania UV. W tabeli 1 zestawiono tworzywa ze wskazaniem ich przydatności w procesie mikrowtryskiwania.



Rys. 8. Schemat układów nagrzewania i chłodzenia formy do mikrowtryskiwania: 1 — fragment wtryskarki, 2 — forma wtryskowa, 3 — wewnętrzny olejowy układ chłodzenia, 4 — transformator wysokiej częstotliwości do grzania indukcyjnego, 5 — układ hydrauliczny przemieszczenia ze sterowaniem PLC, 6 — sterownik układu nagrzewania indukcyjnego, 7 — cewki [25]

Fig. 8. Scheme of heating and cooling systems of a mold in microinjection molding: 1 — injection molding machine fragment, 2 — mold, 3 — inner oil cooling system, 4 — high frequency inductive heating transformer, 5 — hydraulic moving system with PLC control, 6 — inductive heating system controller, 7 — coils [25]

Tabela 1. Przydatność tworzyw polimerowych do mikrowtryskiwania^{*)} [15]

Table 1. Suitability of polymers for microinjection molding [15]

Tworzywo	Jakość struktury	Zdolność do wypełniania gniazda formującego	Łatwość usuwania wypraski z formy
Poliamid (PA)	+++	++	++
Poliamidoimid (PAI)	—	+	—
Poli(tereftalan butylenu) (PBT)	+++	++	++
PBT wysokoudarowy (PBT + 15 % włókna szklanego)	++	++	++
Poliwęglan (PC)	++	++	+
Polieteroeteroketen (PEEK)	+++	—	—
Polieteroimid (PEI)	++	++	—
Poli(metakrylan metylu) (PMMA)	++	+	—
Poliacetal (POM)	+++	+++	++
Polipropylen (PP)	++	+	++
Polistyren (PS)	++	++	—
Polisulfon (PSU)	++	++	—
Poli(eter fenylenu) (PPE)	++	+++	++
Kopolimer cykloolefinowy (COC)	++	++	+
Polimery ciekłokrystaliczne (LCP)	+	++	++

^{*)} +++ bardzo dobra; ++ dobra; + średnia; — zła.

Wady eksploatacyjne procesu mikrowtryskiwania

Zastosowanie mikrowtryskiwania do wytwarzania bardzo małych wyprasek nie pozwala, ze względu na skalę, na porównanie tego procesu z innymi metodami wtryskiwania. Pojawiają się natomiast specyficzne prob-

lemy wynikające z faktu, że masa mikrowyprasek jest niewystarczająca do wywołania reakcji układu sterowania wtryskarki. Dlatego też w formach wtryskowych wykonuje się kanały doprowadzające o znacznie większych wymiarach niż wynikałoby to z obliczeń natężenia przepływu i masy tworzywa niezbędnego do wypełnienia gniazd formujących. Te względnie duże wymiary centralnego kanału wlewowego oraz kanałów doprowadzających w formie wtryskowej powodują jednak powstawanie dużej ilości odpadu stanowiącego niekiedy nawet 95 % całkowitej masy wypraski oraz wlewka i nienadającego się do ponownego wykorzystania [3, 18]. Wadą tego procesu jest również przedłużony czas cyklu wtryskiwania ze względu na konieczność ogrzewania formy w fazie wtrysku do temperatury wyższej od temperatury topnienia tworzywa w celu zapobiegania przedwczesnemu jego zestaleniu.

Zastosowanie mikrowyprasek

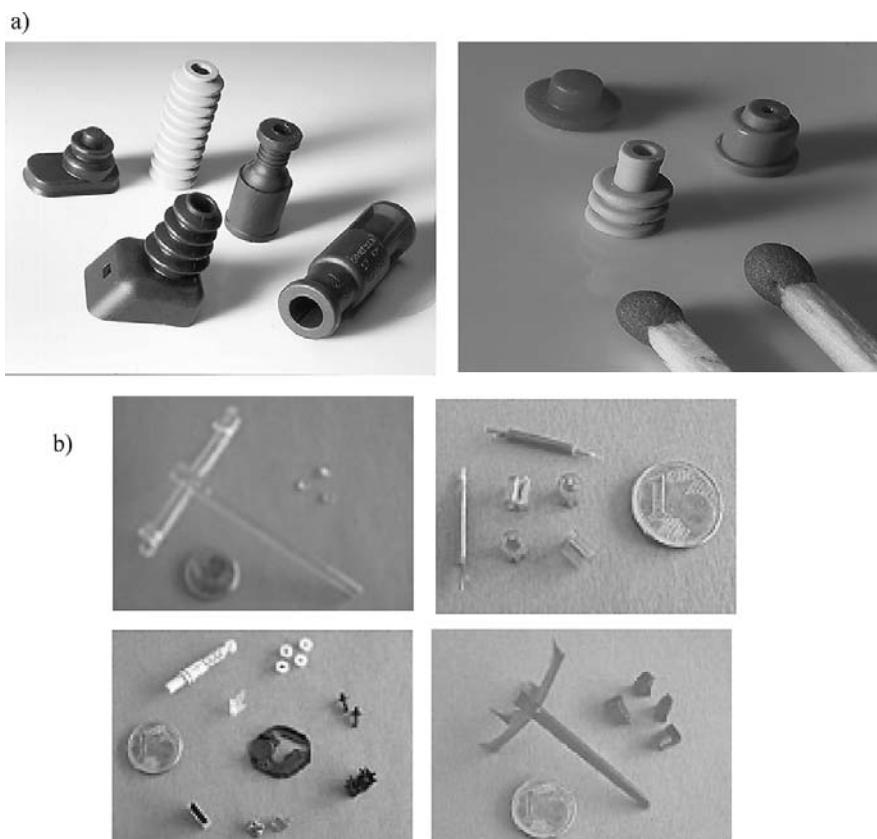
W procesie mikrowtryskiwania wytwarza się wypraski stosowane w rozmaitych dziedzinach życia i gałęziach przemysłu. W medycynie wykorzystuje się je np. do budowy mikroukładów, takich jak mikropompki wewnątrzustrojowe, biochipy, urządzenia diagnostyki medycznej bądź mikropojemniki do hodowli komórek *in vitro* [8]. Takie mikrowypraski mają ścianki grubości do 20 μm , a wymiary niektórych ich elementów są rzędu

0,2 μm [29]. W dziedzinie chemii i biologii używa się mikropompek oraz urządzeń mikrodozujących zbudowanych z mikrowyprasek polimerowych. Urządzenia mikrodozujące są również montowane w głowicach drukarek atramentowych. W przemyśle optycznym mikrowtryskiwanie wykorzystuje się do wytwarzania złączy światłowodów. Wiele mikrowyprasek montuje się w samochodach, np. w poduszkach powietrznych, systemach alarmowych, urządzeniach pomiaru drogi, poziomu oleju, czujnikach wykrywania lodu i deszczu, systemach nawigacyjnych i innych. Ponadto, na drodze mikrowtryskiwania otrzymuje się elementy pamięci komputerowej, czujników pomiarowych, mikrosoczewek, płytek półprzewodnikowych, części zegarków oraz kamer, części głowic odczytująco-zapisujących twardych dysków i napędów CD, a także elementów mechanizmów precyzyjnych, np. kół zębatych lub kół pasowych. Na rysunku 9 pokazano przykłady mikrowyprasek, zamieszczone w materiałach firm Engel oraz Ferromatik Milacron-Europe [31].

WYTWARZANIE WYPRASEK CIENKOŚCIENNYCH

Warunki i przebieg wtryskiwania

Wypraski cienkościenne to takie, których ścianki mają grubość nieprzekraczającą 1,2 mm bądź stosunek długości drogi przepływu tworzywa do grubości ścianki



Rys. 9. Wypraski wytworzone metodą mikrowtryskiwania [31]; producent: a) firma Engel, b) firma Ferromatik Milacron-Europe
Fig. 9. Moldings prepared by microinjection molding method [31]; producers: a) Engel, b) Ferromatik Milacron-Europe

wyrobu wynosi od 100:1 do 150:1 lub nawet więcej [3]. Podczas wytwarzania takich wyprasek tworzywo zestała się w gnieździe formującym znacznie szybciej niż w przypadku wyprasek o grubszych ściankach, uzyskiwanych metodą wtryskiwania konwencjonalnego (rys. 10a). Aby zapobiec przedwczesnemu zestalaniu się ciekłego tworzywa w cienkich ściankach wypraski, podwyższa się temperaturę wtrysku lub stosuje się dużą prędkość wtryskiwania [1, 32–37]. Temperaturę wtrysku zwiększa się zazwyczaj o 38–65 °C w stosunku do zalecanej dla danego tworzywa, natomiast wymaganą prędkość wtryskiwania uzyskuje się wówczas, gdy prędkość ślimaka mieści się w przedziale 500–1400 mm/s, co wiąże się jednak z bardzo dużym ciśnieniem wtryskiwania (240–300 MPa) [3]. Z tego względu zakres możliwych warunków przetwórstwa jest węższy niż w procesie konwencjonalnym (rys. 10b).

Wypraski cienkościenne wytwarza się przy użyciu wtryskarek z układem uplastyczniającym wyposażonym w zamykaną dyszę wtryskową oraz specjalny ślimak z elementami pozwalającymi na intensywne mieszanie, a także w głowicę mieszającą umożliwiającą uzyskanie jednorodnego pod względem składu i temperatury tworzywa [38, 39]. Kolejne etapy przebiegu procesu są następujące:

— Ślimak układu uplastyczniającego wykonuje ruch obrotowy podczas gdy dysza wtryskowa jest zamknięta — tworzywo podlega uplastycznieniu tak jak w konwencjonalnej wtryskarce.

— Po zakończeniu uplastyczniania dysza pozostaje zamknięta, a ciekłe tworzywo spręża się za pomocą ślimaka wykonującego ruch postępowy w kierunku dyszy — ciśnienie sprężonego tworzywa wynosi z reguły 200–250 MPa, a objętość tworzywa zmniejsza się wówczas o ok. 10 %; w takim stanie jest ono w ciągu krótkiego czasu przetrzymywane w układzie uplastyczniającym w celu wyrównania temperatury.

— Ślimak pozostaje w przednim położeniu — następuje otwarcie dyszy, tworzywo rozpręża się i wypełnia gniazda formujące, a ciśnienie wewnątrz tworzywa spełnia rolę ciśnienia docisku.

— Tworzywo ulega szybkiemu zestaleniowi w gnieździe, forma jest natychmiast otwierana i następuje usunięcie wypraski z gniazda.

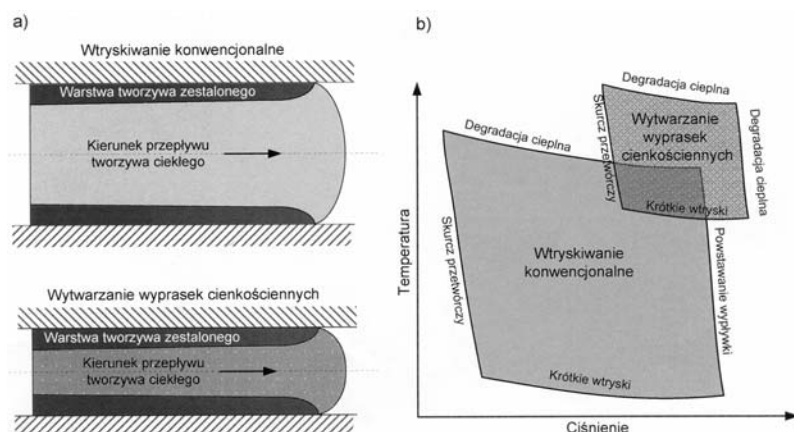
Wypraski cienkościenne mogą być również wytwarzane w formach z kanałami gorącymi z wielopunktowym doprowadzaniem tworzywa do gniazda formującego i/lub zastosowaniem sterowania otwieranie–zamykanie przewęzek, co umożliwi wyeliminowanie obszarów łączenia strumieni tworzywa. Czas wtrysku w przypadku wyprasek cienkościennych wynosi zaledwie 0,1–0,5 s, natomiast czas całego cyklu wtryskiwania mieści się w przedziale 6–20 s [3]. Krótki czas wtrysku korzystnie wpływa na jakość wyprasek, które charakteryzują się małymi naprężeniami własnymi, duża prędkość wtryskiwania oraz intensywne ścinanie tworzywa sprzyjają zaś znacznej orientacji makrocząsteczek.

Wtryskarki

Do wytwarzania wyprasek cienkościennych stosuje się wtryskarki szybkobieżne, o sztywnej konstrukcji, z precyzyjnym prowadzeniem podzespołów formy wtryskowej. Ze względu na niewielką objętość tworzywa używanego do uzyskania takich wyprasek, wtryskarki powinny mieć odpowiednio małe układy uplastyczniające. Zapewnia to krótszy czas przebywania tworzywa w warunkach wysokiej temperatury i tym samym ogranicza możliwości jego degradacji cieplnej. Utrzymywanie parametrów wtryskiwania (ciśnienie i temperatura) w wąskim przedziale (por. rys. 10) umożliwia dużą liczbę punktów regulowania stref ogrzewania układu uplastyczniającego i dyszy wtryskowej.

Formy wtryskowe

Ze względu na duże ciśnienie oraz prędkość przepływu tworzywa w kanałach o bardzo małym przekroju poprzecznym, formy wtryskowe do wytwarzania wyprasek cienkościennych muszą charakteryzować się znaczną wytrzymałością i sztywnością konstrukcji, współosiowością elementów konstrukcyjnych podzes-



Rys. 10. Porównanie warunków przepływu tworzywa w gnieździe formującym (a) oraz zakresu warunków wtryskiwania (b) w procesie konwencjonalnym i podczas wytwarzania wyprasek cienkościennych [3]

Fig. 10. Comparison of the conditions of polymer flow in mold cavity (a) and the ranges of injection molding conditions (b) in a conventional process and thin-wall injection molding [3]

połów formy, zdolnością do bardzo dobrego odpowietrzania gniazd, a także możliwością dokładnej kontroli temperatury. Ponieważ wypraski cienkościenne są podatne na odkształcenia podczas ich usuwania z formy, dlatego układ wypychania wypraski musi być bardzo starannie zaprojektowany i wykonany. Często, w celu zwiększenia sztywności wyprasek, opracowuje się wypraski z żebrami wzmacniającymi, co dodatkowo komplikuje budowę układów wypychania. W przypadku wyprasek z tworzyw o większej sztywności (np. polistyrenu) można stosować tylko mechaniczne wypychacze, natomiast wypraski z tworzyw takich jak poliolefiny usuwa się z formy za pomocą układu mechanicznego wspomaganego działaniem sprężonego powietrza.

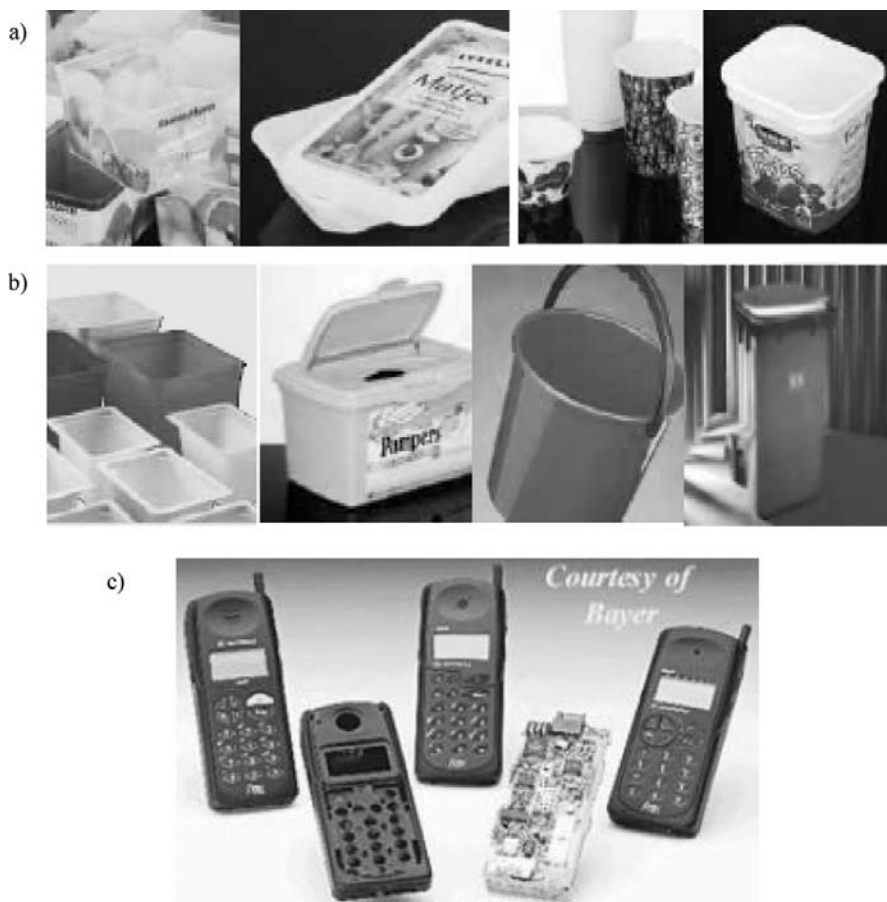
Ze względu na duże ciśnienie wtrysku i docisku należy także uwzględnić podatność wyprasek na przywieranie do ścianek formy. Powierzchnie ścianek formy muszą zatem być polerowane dokładniej (gładziej) niż ma to miejsce w procesie wtryskiwania konwencjonalnego. Przewężki mają zazwyczaj przekrój poprzeczny większy od przekroju ścianki wypraski, co zapewnia odpowiedni przepływ ciekłego tworzywa oraz dostateczne jego upakowanie w gnieździe formującym podczas fazy docisku i pozwala na zmniejszenie anizotropii skurczu w wypraskach.

Tworzywa

Do wytwarzania wyprasek cienkościennych można stosować większość tworzyw termoplastycznych. Najbardziej wskazane są te, które dają się szybko uplastyczyć w kolejnych krótkich cyklach wtryskiwania a ponadto charakteryzują się dobrą przewodnością cieplną oraz niewielką wartością ciepła właściwego. Najczęściej przetwarza się poliwęglan, terpolimer ABS, mieszaniny PC/ABS oraz poliamid 6. Wypraski z tych polimerów, pomimo cienkiej ścianki, mają dostatecznie dobre właściwości wytrzymałościowe. Wykorzystuje się również polistyren i poliolefiny, zwłaszcza na opakowania jednorazowego użytku.

Charakterystyka użytkowa procesu wytwarzania wyprasek cienkościennych

Istotną zaletę omawianego procesu stanowi mały ciężar wypraski, a także związana z tym oszczędność tworzywa i znaczne skrócenie czasu ochładzania wyrobu. Wpływa to na obniżenie kosztów produkcji oraz kosztów zagospodarowania odpadów użytkowych, a zatem i na zmniejszenie ceny gotowego produktu. Wadą jest natomiast trudniejszy proces technologiczny



Rys. 11. Przykłady wyprasek cienkościennych: a — opakowania produktów spożywczych, b — pojemniki, c — obudowy telefonów komórkowych [40]

Fig. 11. Examples of thin-wall moldings: a — food contact packagings, b — containers, c — mobile telephones casings [40]

i węższy zakres parametrów wtryskiwania (wartości ciśnienia i temperatury) w porównaniu z procesem konwencjonalnym.

Wskazane jest stosowanie wtryskarek specjalnie przystosowanych do wtryskiwania z dużą prędkością i w warunkach dużego ciśnienia tworzywa. Formy wtryskowe są droższe o ok. 30–40 % ze względu na wspomniany już wymóg ich dokładnej obróbki wykończeniowej oraz dobrego odpowietrzania gniazd, a także z powodu bardziej złożonego układu wypychania wyprasek. Ponadto gotowe wypraski mogą charakteryzować się niekorzystną mniejszą wytrzymałością na rozciąganie, wynikającą z intensywnego ścinania tworzywa pod wpływem dużej prędkości wtryskiwania, co przyczynia się do ich degradacji mechanicznej.

Zastosowanie wyprasek cienkościennych

Wypraski cienkościennie stosuje się w urządzeniach elektronicznych lub telekomunikacyjnych (np. obudowy sprzętu komputerowego, telefonów komórkowych), jako elementy urządzeń medycznych bądź optycznych, panele samochodowe i tablice przyrządów oraz kontenery i palety do pakowania wytworów o dużych wymiarach. Mogą być wykonywane jako wytwory wielowarstwowe, np. wypraski z warstwą zewnętrzną z niepełnionego tworzywa termoplastycznego i wewnętrzną z tworzywa wzmocnionego lub wypraski z ochronną warstwą z elastomeru termoplastycznego. Wypraski cienkościennie znajdują również zastosowanie jako opakowania, zwłaszcza pojemniki, pudełka, pokrywki bądź tace do przechowywania produktów spożywczych. Przykłady różnorodnych zastosowań wyprasek cienkościennych ilustruje rys. 11.

PODSUMOWANIE

Wytwarzanie mikrowyprasek oraz wyprasek cienkościennych, prowadzone wprawdzie z wykorzystaniem znanej od wielu lat metody przetwórstwa, należy jednak potraktować jako specjalną metodę wtryskiwania ze względu na konieczność zapewnienia odmiennych niż w konwencjonalnym procesie warunków wypełniania tworzywem gniazd formujących oraz usuwania wyprasek z formy. Postęp techniczny w dziedzinie przetwórstwa tworzyw polimerowych umożliwił zastosowanie w tym przypadku dodatkowego specjalistycznego wyposażenia wspomagającego działanie wtryskarek. Przykład może stanowić komputerowe sterowanie urządzeniami współpracującymi z wtryskarką, co w rezultacie pozwala na efektywne wytwarzanie wyprasek o omówionych powyżej cechach geometrycznych. Przedstawiony w niniejszej publikacji proces znajduje coraz większe zastosowanie przede wszystkim ze względu na miniaturyzację urządzeń i układów wykorzystywanych np. w medycynie, optyce oraz w przemyśle samochodowym i komputerowym.

LITERATURA

- Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989.
- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993, str. 177–228.
- Osswald T. A., Turng L-S., Gramann P. J.: „Injection Molding Handbook”, Hanser Publishers, Munich, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati 2001.
- Zwierzyński A.: *Mechanik* 2000, nr 11, 787.
- Bociąga E.: *Polimery* 2005, 50, 10.
- Bociąga E.: *Polimery* 2007, 52, 88.
- Błędzki A. K., Faruk O., Kirschling H., Kühn J., Jaskiewicz A.: *Polimery* 2006, 51, 697.
- Kaczmar J. W., Brzostek A.: *Polimery* 2007, 52, 94.
- Brzostek A., Kaczmar J.: *Polimery* 2007, 52, 179.
- Whiteside B. R., Martyn M. T., Coates P. D., Greenway G., Allen P., Hornsby P.: „Micromoulding: Interrogating the Process”. „The Polymer Processing Society Nineteenth Annual Meeting”, Melbourne 2003, mat. konf. str. 136.
- Coates P. D., Martyn M. T., Whiteside B. R.: „Micromoulding: Extreme Injection Processing — for Controlled Feature Products”. „The Polymer Processing Society Twentieth Annual Meeting”, Ohio 2004, mat. konf. str. 215.
- Yang S. Y., Nian S. C., Sun I. C.: *Int. Polym. Process.* 2002, XVII, 354.
- Nian S. C., Yang S. Y.: *Int. Polym. Process.* 2004, XIX, 402.
- Nian S. C., Yang S. Y.: *Int. Polym. Process.* 2005, XIX, 441.
- Zhao J., Mayes R. H., Chen G., Chan P. S.: „Micro Injection Moulding Process”. „The Polymer Processing Society Eighteenth Annual Meeting”, Guimaraes 2002, mat. konf. str. 163.
- Zhao J., Mayes R. H., Chen G., Xie H., Chan P. S.: *Polym. Eng. Sci.* 2003, 43, 1542.
- Whiteside B., Martyn M. T., Coates P. D.: „Micromoulding: Process Evaluation”. ANTEC 2004, mat. konf. str. 757.
- Kleinebrahm M.: „Injection Moulding Microparts. Production Solutions with Screw-Plunger Injection Moulding Machines”. „The Polymer Processing Society Twenty First Annual Meeting”, Leipzig 2005, KL 2.1.
- Jüttner G., Jacob S., Krajewsky P., Michaelis J., Bloß P.: „A New Micro Injection Moulding Machine”. por. [18], SL 2.4.
- Zabrzewski B. w pracy zbiorowej: „Technologie wtryskiwania. Jakość i efektywność”. Wyd. Plastech, Warszawa 2000, str. 71.
- Löhl R., Kleinebrahm M. w [20], str. 77.
- Zhao J., Ge Ch., Sing Ch. P., Debowski M.: „Interaction of Polymer Material, Mold Design and Process Condition in Micro Molding Process”, w [10], mat. konf. str. 275.

23. Tseng S. Ch., Chen L. L., Chiu Ch. P.: „A New Design Method to Improve Flow Uniformity of Gates in Micro-Injection Molding”, w [15], mat. konf. str. 207.
24. Holzhauser M., Zippmann V. w pracy zbiorowej „Nowoczesne formy wtryskowe. Problemy konstrukcji i użytkowania”. Wyd. Plastech, Warszawa 2001, str. 203.
25. Tseng S. C., Chen Y. C., Lin C. H., Shew B. Y., Kuo C. L.: *Int. Polym. Process.* 2006, **XXI**, 340.
26. Michaeli W., Gärtner R.: „Injection Molding of Micro-Structured Surfaces”. ANTEC 2004, mat. konf. str. 752.
27. Michaeli W., Gärtner R., Opfermann D.: „Injection Molding of Micro Structures and Micro-Structured Surfaces”, por. [18], SL 2.1.
28. Nian S. C., Yang S. Y., Lin C. H.: „Study of the Performance of Rapid Mold Heating/Cooling System for Micro Injection Molding”, por. [10], mat. konf. str. 35.
29. Angelov A. K., Coulter J. P.: „Micromolding Product Manufacture — a Progress Report”. ANTEC 204, mat. konf. str. 748.
30. Huang C. K., Chiu S. W.: „The Applications of Nanomaterials in Micro Injection Molding”, por. [18], SL 2.3.
31. Micro Injection Molding: www.ferromatik.com.
32. Wang T. H., Young W. B., Wang J.: *Int. Polym. Process.* 2002, **XVII**, 146.
33. Hasegawa S., Yokoi H.: „Gas-vent Effect on LCP Molded Part in Ultra High-speed Injection Molding”, por. [11], mat. konf. str. 211.
34. Ito H., Yagisaw Y., Saito T., Yasuhara T., Yamagiwa Y.: „Fundamental Study on Structure Development of Thin-wall Injection Molded Products”, por. [18], SL2-10.
35. Nian S. C., Yang S. Y.: „Molding of Thin Sheets Using Impact Micro-injection Molding”, por. [18], SL2-2.
36. Yu L., Koh Ch. G., Lee L. J., Koelling K. W.: „Experimental and Numerical Investigation of Thin-Wall Injection Molding with Micro-Features”, por. [15], mat. konf. str. 325.
37. Thin Wall Injection Molding: www.ferromatik.plyworld.de.
38. Engel X-Melt. Injection Expansion Moulding for Thin-wall and Precise Components: www.engel.at.
39. Barrel Compression Injection Molding (BCI): www.ferromatik.plyworld.de.
40. „Injection Moulding Systems. Packaging and Thin-wall products”, materiały firmy Krauss-Maffei.