

WTRYSKIWANIE PRECYZYJNE

Elżbieta Bociąga, Tomasz Jaruga

Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją, Politechnika Częstochowska
ul. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa, bociaga@kpts.pcz.czyst.pl

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano proces wytwarzania wyprasek precyzyjnych z tworzyw polimerowych. Przedstawiono charakterystyczne różnice pomiędzy procesem wtryskiwania konwencjonalnego oraz precyzyjnego, a także cechy tworzyw stosowanych w obydwu przypadkach. Omówiono wpływ różnych czynników na efektywność wtryskiwania precyzyjnego, takich jak działania człowieka, forma wtryskowa, wtryskarka, tworzywo przetwarzane, warunki wtryskiwania oraz metoda wtryskiwania.

Słowa kluczowe: wypraski precyzyjne, efektywność wtryskiwania precyzyjnego

WSTĘP

Wypraski wtryskowe o małych wymaganiach co do jakości mogą być wytwarzane metodą konwencjonalną, natomiast wypraski o ściśle ustalonych cechach jakościowych mogą być uzyskane tylko w specjalnych warunkach wtryskiwania, w procesie nazywanym wtryskiwaniem precyzyjnym lub dokładnościowym [Sikora 1993, 2006, Greener i in. 2006]. Wypraski precyzyjne muszą charakteryzować się bardzo dużą dokładnością wymiarową, brakiem wypływek, dużą zdolnością do przenoszenia obciążeń, odpornością na ścieranie i zużycie, bardzo dobrym stanem powierzchni, powtarzalną dokładnością. W tabeli 1 przedstawiono charakterystyczne różnice pomiędzy procesem wtryskiwania konwencjonalnego oraz precyzyjnego, a także cechy tworzyw stosowanych w obydwu przypadkach [Greener i in. 2006]. Efektywność wtryskiwania precyzyjnego jest związana z wieloma czynnikami, m.in. takimi jak forma wtryskowa, wtryskarka, tworzywo przetwarzane, warunki oraz metody wtryskiwania, a także z rolą człowieka w przygotowaniu i kontroli tego procesu.

CHARAKTERYSTYKA PROCESU

Proces wtryskiwania precyzyjnego jest prowadzony na granicy możliwości technologii, co wynika z bardzo wąskich zakresów warunków jego przebiegu. Niezbędne jest ciągłe monitorowanie i kontrola procesu, mogą być konieczne częste interwencje wyso-

Tabela 1. Porównanie procesów wtryskiwania konwencjonalnego i precyzyjnego oraz tworzyw stosowanych w tych procesach [Greener i in. 2006]

Table 1. Comparison of conventional and precise injection moulding processes and polymers used in these processes

Cecha procesu	Wtryskiwanie precyzyjne	Wtryskiwanie konwencjonalne
Krytyczna faza cyklu wtryskiwania	docisk	wypełnianie gniazda
Temperatura formy	wysoka	niska
Temperatura wtryskiwania	wysoka	niska
Czas cyklu wtryskiwania	długi	krótki
Ciśnienie docisku	duże	średnie
Prędkość wtryskiwania	mała	duża
Główne problemy	zapadnięcia, skurcz, samoistne odkształcenia wyprasek	krótkie wtryski (niecałkowite wypełnienie gniazd), wypływy
Wypraski cienkościenne	łatwe do wytwarzania	trudne do wytwarzania
Wypraski grubościenne	trudne do wytwarzania	łatwe do wytwarzania

Właściwości tworzywa	Wtryskiwanie precyzyjne	Wtryskiwanie konwencjonalne
Temperatura zeszklenia	wysoka	średnia
Chłonność wody	bardzo mała	bez ograniczeń
Sztywność	duża	bez ograniczeń
Lepkość tworzywa ciekłego	mała	mała

ko wykwalifikowanego i doświadczonego pracownika. Człowiek odgrywa znaczącą rolę na etapie wyboru tworzywa na wypraski, określania sposobu postępowania z tworzywem przed procesem wtryskiwania, projektowania wypraski, opracowania procesu technologicznego wytwarzania wyprasek oraz projektowania, wykonywania, montażu i użytkowania formy wtryskowej. Decyduje również o wyborze właściwej wtryskarki, jej dodatkowym wyposażeniu i obsłudze, a ponadto musi podjąć decyzje odnośnie do metody wtryskiwania.

FORMA WTRYSKOWA

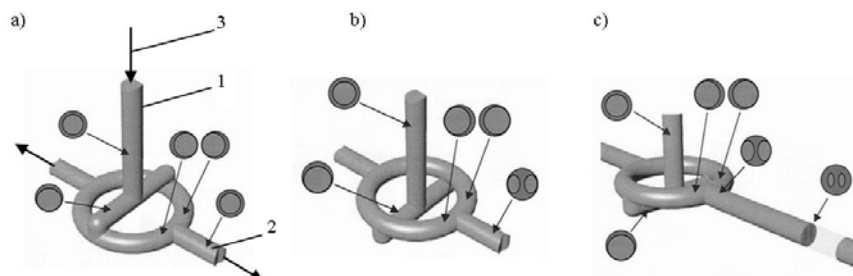
Formy do wtryskiwania precyzyjnego muszą mieć bardzo starannie zaprojektowaną budowę i dokładnie wykonane podzespoły. Ze względu na nieuniknioną niedoskonałość prowadzenia procesu wtryskiwania, dokładność wykonania formy musi być większa niż dokładność wyprasek. Bardzo istotna jest budowa i wykonanie kanałów przepływowych i gniazd formujących. Wtryskiwanie precyzyjne z wykorzystaniem form jednogniazdowych nie stwarza dużych trudności, pod warunkiem, że formy te charakteryzują się dużą sztywnością [Sikora 1993]. W formach wielogniazdowych konieczne są jednakowe warunki wypełniania i zestalania tworzywa we wszystkich gniazdach. Należy przede wszystkim zapewnić jednakową temperaturę gniazd w fazie wypełniania, taką samą intensywność ich wypełniania oraz jednakowe ciśnienie tworzywa w gniazdach.

Jednakową temperaturę gniazd uzyskuje się poprzez regulację temperatury formy, zastosowanie poprawnie zaprojektowanego układu chłodzenia lub grzania formy. Nowym rozwiązaniem są formy wykonane na przykład metodą bezpośredniego laserowego

spiekania metali (DMLS – Direct Metal Laser Sintering) z kanałami chłodząco-grzejnymi umiejscowionymi w jednakowej odległości od powierzchni gniazda formującego, nazywane kanałami konformalnymi [Dybała i in. 2006].

Jednakową intensywność wypełniania gniazd uzyskuje się poprzez dobór kształtu i rozmiarów kanałów przepływowych oraz takie ich rozmieszczenie w formie, aby zapewniło identyczne spadki ciśnienia tworzywa w gnieździe. Takie warunki są spełnione przy gwiazdowym układzie kanałów doprowadzających, o jednakowej długości i takim samym przekroju poprzecznym oraz jednakowych przewężkach [Sikora 1993]. Występują tutaj jednak niekorzystne warunki do bezpośredniego wypełniania gniazd strumieniem tworzywa z ochłodzonym jego czołem. W formach z równoległym układem kanałów doprowadzających należy uwzględnić kinetykę przepływu tworzywa w kanałach doprowadzających [Bociąga 2001]. Takie układy, charakteryzujące się taką samą długością i jednakowym przekrojem poprzecznym odpowiadających sobie odcinków kanałów i przewężek, nie zapewniają równomiernego wypełniania gniazd formujących, jeżeli strumienie tworzywa zmieniają kierunek przepływu w różny sposób. Wynika to z asymetrii strumienia tworzywa po zmianie kierunku przepływu, innej w przypadku zmiany kierunku np. w prawą bądź lewą stronę. Skutkiem tego jest zróżnicowana masa, struktura i właściwości wyprasek [Bociąga i in. 2006].

W opracowaniu Beaumonta [2004] przedstawiono specjalną budowę rozgałęzień kanałów doprowadzających, umożliwiającą uzyskanie symetrycznego strumienia tworzywa po zmianie kierunku przepływu (rys. 1). Ich zastosowanie pozwala na równoczesne wypełnianie gniazd tworzywem o jednakowych właściwościach i uzyskiwanie wyprasek precyzyjnych, jednak zwiększa istotnie koszt wykonania formy wtryskowej.



Rys. 1. Rozwiązania konstrukcyjne (MeltFlipper) rozgałęzień kanałów doprowadzających form wtryskowych ze wskazanym rozkładem obszarów intensywnego ścinania: a) w kanale (2) takim samym jak w kanale (1), b), c) w kanale (2) rozkład symetryczny, ale inny niż w kanale (1); 3 – kierunek przepływu tworzywa [Beaumont 2004]

Fig. 1. MeltFlipper designs of runners branchings with high shear rate areas pointed: a) in runner (2) the same as in runner (1), b), c) in runner (2) symmetrical melt conditions, but different than in runner (1); 3 – melt flow direction

Ze względów ekonomicznych często stosuje się formy z szeregowym układem gniazd (charakteryzujących się różną długością kanałów doprowadzających), wykonując korektę przewężek, najczęściej przez zróżnicowanie ich przekrojów poprzecznych [Sikora 1993, Osswald i in. 2001]. Przy przewężkach o różnych przekrojach gniazda są jednak wypełniane tworzywem o odmiennych właściwościach, co skutkuje niejednorod-

nością struktury, masy i właściwości wyprasek [Bociąga 2001]. W formach wielogniazdowych z kanałami doprowadzającymi o różnej długości i z jednakowymi przewężkami jest możliwe uzyskanie wyprasek precyzyjnych, ale niezbędny jest wówczas specjalny dobór warunków wtryskiwania. Ich zakres musi być bardzo wąski w stosunku do ogólnie przyjmowanego [Sikora i in. 1984].

WTRYSKARKA

Wtryskarki precyzyjne muszą charakteryzować się dokładnym prowadzeniem podzespołów formy, możliwością ustalania i kontrolowania warunków wtryskiwania w bardzo wąskim zakresie oraz bardzo dobrym stanem technicznym. Ważne jest zapewnienie określonej temperatury i objętości tworzywa wtryskiwanego, prędkości wtryskiwania oraz szybkiego i powtarzalnego przełączania ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku [Greener i in. 2006]. Ogólnie wtryskarki dzieli się na dziewięć klas dokładności działania, w zależności od zakresu zmienności warunków wtryskiwania.

Tabela 2. Dopuszczalne wartości zmienności warunków wtryskiwania wtryskarek o różnej dokładności działania [Greener i in. 2006]

Table 2. Acceptable values of injection moulding conditions variability for machines of different operation accuracy

Warunek 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

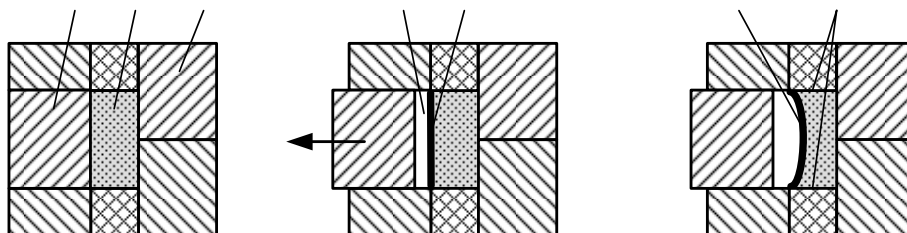
W tabeli 2 porównano maksymalne dopuszczalne wartości zmienności podstawowych warunków wtryskiwania w przypadku wtryskarek klasy 9 (o najmniejszej dokładności działania) oraz klasy 1 (o największej dokładności). Do procesu wtryskiwania precyzyjnego należy stosować wtryskarki o największej dokładności działania. Podczas wtryskiwania precyzyjnego często stosuje się odgazowanie tworzywa, które może odbywać się w formie bądź w układzie uplastyczniającym wtryskarki [Sikora 1993].

METODA WTRYSKIWANIA

Wypraski precyzyjne mogą być wytwarzane 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 [Osswald i in. 2001, Bociąga 2005]. Metodą tą wytwarza się często wypraski precyzyjne, takie jak płyty kompaktowe oraz soczewki optyczne o dużej przejrzystości.

Metodą wtryskiwania wspomaganego gazem lub wodą jest możliwe wytwarzanie wyprasek lekkich, sztywnych, bez pęcherzy i zapadnięć, o dobrej jakości powierzchni

i małym skurczu [Osswald i in. 2001, Bociąga 2007]. Nie wykazują one skłonności do samoistnego odkształcania się, ze względu na mniejsze naprężenia własne niż w wypraskach litych. Podobny efekt uzyskuje się stosując wtryskiwanie porujące lub mikroporujące [Osswald i in. 2001]. Wypraski precyzyjne są wytwarzane również w procesach wtryskiwania dwuskładnikowego oraz otryskiwania wstawek [Osswald i in. 2001, Bociąga 2005]. Zastosowanie wstawek przyczynia się do zmniejszenia skurczu wyprasek i polepszenia stabilności ich wymiarów.



Rys. 2. Schemat procesu wtryskiwania soczewek precyzyjnych z wykorzystaniem skurczu tworzywa do zmiany kształtu soczewki: 1 – ruchoma wstawka formy, 2 – tworzywo w gnieździe formującym, 3 – forma wtryskowa, 4 – szczelina wypełniona powietrzem, 5 – swobodna powierzchnia wypraski, 6 – powierzchnia soczewki ukształtowana w wyniku skurczu tworzywa, 7 – powierzchnie soczewki dokładnie odwzorowujące powierzchnie gniazda [Ueda i in. 2006]

Fig. 2. Scheme of precise injection moulding process by inducing sink mark of lens: 1 – movable mould insert, 2 – melt in cavity, 3 – mould, 4 – air gap, 5 – free surface of lens, 6 – lens surface formed by polymer shrinkage (sink mark), 7 – lens surfaces precisely replicating cavity surface

W pracy Ueda i in. [2006] zaproponowano metodę wytwarzania precyzyjnych soczewek optycznych, w której wykorzystuje się zjawisko skurczu tworzywa do kontrolowanej zmiany kształtu wypraski (rys. 2). Tworzywo jest wtryskiwane do gniazda przy małym ciśnieniu. Na początku fazy ochładzania przesunięcie ruchomej wstawki (1) powoduje utworzenie szczeliny wypełnionej powietrzem (4) między swobodną powierzchnią (5) wypraski i powierzchnią formy. Powietrze stanowi warstwę izolującą, co powoduje, że powierzchnia swobodna wypraski jest wolniej ochładzana niż pozostałe jej obszary. Skurcz tworzywa na powierzchni swobodnej jest większy, czego skutkiem jest powstawanie zapadnięć i kształtowanie wklęsłej powierzchni soczewki (6). Wypraski wytworzone w ten sposób charakteryzują się małymi naprężeniami własnymi oraz dobrymi właściwościami optycznymi.

WARUNKI WTRYSKIWANIA

Warunki wtryskiwania oddziałują na wiele cech wyprasek, ich strukturę, właściwości mechaniczne, cieplne, stan powierzchni, masę, skurcz, stan naprężeń oraz dokładność wymiarów wyprasek. Aby uniknąć zróżnicowania cech wyprasek w procesie wtryskiwania precyzyjnego, zakres zalecanych warunków wtryskiwania dla danego tworzywa jest znacznie mniejszy niż ogólnie przyjmowany w literaturze bądź wskazaniach producentów tworzyw [Sikora i in. 1984, Greener i in. 2006].

TWORZYWO WTRYSKIWANE

Jedną z podstawowych właściwości decydujących o przydatności tworzywa do wytwarzania wyprasek precyzyjnych jest jego skurcz. Tworzywa amorficzne charakteryzują się mniejszym skurczem (0,3–0,8%) niż częściowo krystaliczne (1–3%), są zatem materiałami bardziej odpowiednimi do wtryskiwania precyzyjnego [Greener i in. 2006]. Jednak nie wyklucza się możliwości stosowania tworzyw krystalicznych, z tym, że należy przewidzieć problemy związane z ich skurczem. Skurcz oraz stabilność wymiarów wyprasek można polepszyć przez wprowadzanie do tworzyw napelnaczy nieorganicznych. Korzystne jest stosowanie tworzyw o wysokiej temperaturze zeszklenia, wyższej od temperatury użytkowania wyprasek. Przy wyborze tworzywa należy uwzględnić warunki użytkowania wyprasek, np. wilgotność środowiska, temperaturę, stan obciążenia oraz wymagania odnośnie do ich cech optycznych.

PIŚMIENNICTWO

- Beaumont J.P. 2004. *Runner and Gating Design Handbook*. Hanser Publishers, Munich.
- Bociąga E. 2001. Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
- Bociąga E. 2005. Niekonwencjonalne metody wtryskiwania. *Polimery* 50, 1, 10–19.
- Bociąga E. 2007. Wtryskiwanie tworzyw polimerowych wspomagane wodą oraz gazem i wodą. *Polimery* 52, 2, 88–93.
- Bociąga E., Jaruga T. 2006. Badania mikroskopowe przepływu tworzywa w kanałach 16-gniazdowej formy wtryskowej. *Polimery* 51, 11–12, 843–851.
- Dybała B., Frankiewicz M. 2006. Ekstremalne skrócenie czasu cyklu przez użycie konfiguracji konformalnego chłodzenia. *TS Raport* 41, 34–37.
- Greener J., Wimberger-Friedl R. 2006. *Precision Injection Molding*. Hanser Publishers, Munich.
- Osswald T.A., Turng L-S., Gramann P.J. 2001. *Injection Molding Handbook*. Hanser Publishers, Munich, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati.
- Sikora R. 1993. *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. WE, Warszawa.
- Sikora R. (red.) 2006. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych*. Podstawy logiczne, formalne i terminologiczne. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin.
- Sikora R., Kloc J. 1984. Próba optymalizacji precyzyjnego wtryskiwania wielogniazdowego polietylenu. *Post. Technol. Masz. Urząd.* 2, 9–17.
- Ueda K., Watanabe J., Sawada K., Sugimoto Y., Yamanaka T., Koseko H. 2006. *Precise Molding Process by Inducing Sink Mark*. PPS-22 The Polymer Processing Society Twentieth Annual Meeting, Yamagata, G08.23.

PRECISE INJECTION MOULDING

Summary. The process of precise injection moulded polymeric parts production was generally characterized. Main differences between conventional and precise injection moulding processes and also properties of polymers applicable in both cases were pointed. The influence of different factors on precise injection moulding efficiency, such as: man activities, mould, injection moulding machine, processed material, injection moulding conditions and method of injection moulding was described.

Key words: precise moulded parts, efficiency of precise injection moulding