

ROBERT SIKORA¹⁾, ELŻBIETA BOCIĄGA²⁾Wybrane zagadnienia przepływu tworzywa w formie wtryskowej^{*)}

SOME PROBLEMS OF POLYMER FLOW IN INJECTION MOLD

Summary — The descriptions of liquid polymer flow in the injection mold channels, presented in the literature data, have been discussed. The flow is unstable and non-isothermal. Most often the symmetrical model is used to describe it although this model is true only at determined stable conditions. When thermal or kinetic conditions at both sides of the channel vary (e.g. because of the differences of temperature or surface roughness) thermokinetic flow asymmetry occurs. This asymmetry may be also caused by the change of flow direction in the channels e.g. in the area where the sprue joins the runner or in the cavities with inserts, bosses and ribs. In multicavity molds the polymer stream can change the direction even several times that lead to non-uniform filling of cavities. As well the weld lines areas are areas of polymer flow disturbances. Asymmetrical and non-uniform flow affects the injection molding efficiency evaluated on the basis of determinations of functional properties and surfaces qualities of molded parts.

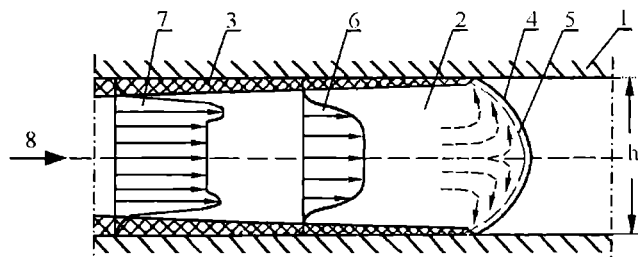
Key words: injection molding, polymer flow, symmetrical flow, thermokinetic flow asymmetry, polymer streams weld line.

Przepływ tworzywa ciekłego w formie wtryskowej — odbywający się przez kanał centralny, kanały doprowadzające oraz przewężkę do gniazda formującego — jest przepływem nieustalonym i nieizotermicznym [1—6]. Nieustalony charakter przepływu wynika z cykliczności procesu wtryskiwania oraz krótkiego czasu trwania przepływu, natomiast jego nieizotermiczność jest związana z wytwarzaniem ciepła wskutek tarcia wewnętrznego w tworzywie ciekłym oraz zewnętrznego tarcia tworzywa o ścianki kanałów formy, a także z różnicą temperatury formy i tworzywa ciekłego [7—9].

PRZEPŁYW SYMETRYCZNY

Przepływ tworzywa w kanale doprowadzającym powinien odbywać się tak, aby było zapewnione całkowite wypełnienie gniazda formującego, a tym samym uzyskanie poprawnej wypraski, w połączeniu z możliwie najmniejszym spadkiem ciśnienia i obniżeniem temperatury [7, 10—12]. Najczęściej przedstawiany w literatu-

rze model nieizotermicznego przepływu tworzywa w kanale jest pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Klasyczny model przepływu tworzywa przez kanał: 1 — ścianka kanału, 2 — plastyczny rdzeń tworzywa, 3 — warstwa tworzywa zestalonego, 4 — front strumienia tworzywa i jego rozkład, 5 — przepływ poprzeczny tworzywa (efekt „fontannowy”), 6 — rozkład prędkości przepływu, 7 — rozkład temperatury, 8 — kierunek przepływu tworzywa, h — wysokość kanału [7, 9, 10, 12, 13] (por. tekst)

Fig. 1. Classical model of polymer flow through the channel: 1 — channel wall, 2 — plastic core of polymer, 3 — frozen layer, 4 — melt front and its pattern, 5 — crosswise flow of polymer („fountain” effect), 6 — flow velocity profile, 7 — temperature profile, 8 — flow direction, h — channel thickness [7, 9, 10, 12, 13] (see text)

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

²⁾ Politechnika Częstochowska, Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją, Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa, e-mail: bociąga@kpts.pczest.pl

^{*)} Wykład wygłoszony w ramach VII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Puszczykowo, 2—5 czerwca 2002 r.

Tworzywo ciekłe, stykając się ze ściankami kanału o znacznie niższej temperaturze, ulega stopniowemu ze-

stalaniu tworząc w efekcie warstwę tworzywa stałego, która stanowi izolację cieplną dla tworzywa przepływającego po jej ścianie wewnętrznej. Front strumienia przepływającego tworzywa, ochładzany dodatkowo powietrzem znajdującym się w kanale, ma niższą temperaturę, a więc większą lepkość niż jego warstwy wewnętrzne [14, 15]. Na skutek przepływu poprzecznego tworzywa, nazywanego w literaturze efektem „fontanowym” („*fountain effect*”), ta przechłodzona warstwa tworzywa przemieszcza się w kierunku prostym do podstawowego kierunku przepływu, osadzając się w postaci zestalonej na ściankach kanału [3, 5, 16–18].

Rozkład temperatury tworzywa w kanale zależy nie tylko od różnicy między temperaturą ścianki kanału i tworzywa ciekłego oraz współczynnika przewodzenia ciepła tworzywa, lecz także od jego lepkości, gęstości i ciepła właściwego, jak również od prędkości przepływu [7]. Rozkład ten jest związany z przewodzeniem ciepła od ścianek kanału, konwekcją oraz wewnętrznym generowaniem ciepła. Zjawisko wewnętrznego generowania ciepła występuje najintensywniej w obszarach, w których jest największy gradient poprzeczny prędkości przepływu sąsiadujących warstw tworzywa, a więc i maksymalna szybkość ścinania, tj. w pobliżu zestalonej warstwy tworzywa [19]. W obszarze tym temperatura osiąga wartość największą [7, 15]. W środkowej części kanału zjawisko wewnętrznego generowania ciepła prawie zanika, gdyż gradient poprzeczny prędkości w tym miejscu jest bliski zeru. Gradient wzdłużny prędkości w tym obszarze, ze względu na niezmiennicze pole przekroju poprzecznego kanału, nie wywiera istotnego wpływu na zjawisko wewnętrznego generowania ciepła. Od rozkładu temperatury tworzywa w kanale zależą rozkłady jego lepkości i prędkości, a tym samym straty ciśnienia w kanale.

Przepływ tworzywa w przewężce ma inny charakter niż w kanałach, co jest wywołane gwałtownym zmniejszeniem przekroju poprzecznego w tym obszarze oraz bardzo krótkim czasem trwania przepływu, wynikającym z małej długości przewężki i zwiększonej prędkości przepływu tworzywa. Drastyczne zwężenie przekroju poprzecznego strumienia przepływającego przez przewężkę powoduje, że jego odkształcanie następuje nie tylko w wyniku ścinania, ale również jako skutek ściskania i rozciągania [7]. Bardzo krótki czas przepływu wpływa też na to, że ma on charakter nieustalony.

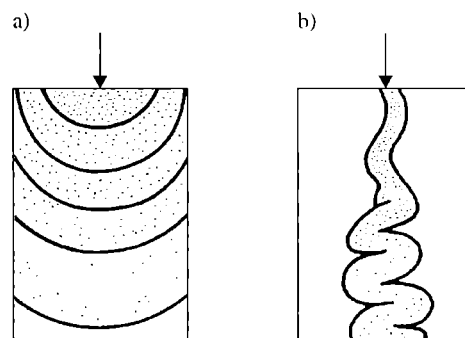
Przepływ tworzywa przez przewężkę jest uwarunkowany jej kształtem i wymiarami oraz prędkością wtryskiwania oraz lepkością tworzywa, co z kolei zależy od temperatury tworzywa i formy a także ciśnienia wtryskiwania. Kształt przewężki decyduje o procesie wypełniania gniazda formującego. Najkorzystniejszy przepływ, zapewniający równomierne wypełnianie gniazda, występuje w przypadku przewężki rozszerzającej się w kierunku przepływu [10]. W przewężce występuje znaczny spadek ciśnienia, na co wpływają zwłaszcza wymiary jej przekroju poprzecznego, nato-

miast długość ma mniejsze znaczenie [7]. Według autorów innych prac [14, 20], długość przewężki jest jednak istotna w ocenie spadku ciśnienia w gnieździe formującym; dlatego też, aby zminimalizować straty ciśnienia, zalecają oni stosowanie możliwie krótkiej przewężki.

Prędkość wtryskiwania decyduje o prawidłowym przepływie tworzywa w przewężce. W warunkach mniejszej prędkości wtryskiwania występuje laminarny przepływ tworzywa do gniazda, natomiast gdy prędkość przepływu jest większa, może on przekształcić się w nielaminarny i stać się przyczyną niewłaściwego przebiegu procesu wypełniania gniazda formującego [10, 21].

Zjawiska zachodzące w gnieździe formującym można podzielić na związane z następującymi trzema fazami cyklu wtryskiwania: wypełnianiem gniazda, dociskiem i ochładzaniem wypraski [10–12, 15, 22–24].

Warunkiem uzyskania poprawnej wypraski jest laminarne wypełnianie tworzywem gniazda formującego [10–12, 22]. W zależności od prędkości wtryskiwania mogą wystąpić dwa zasadnicze sposoby wypełniania gniazda: proste i strumieniowe [4, 20, 22, 25] (rys. 2).



Rys. 2. Schemat wypełniania gniazda formującego formy wtryskowej; wypełnianie: (a) proste, (b) strumieniowe [4, 20, 22] (por. tekst)

Fig. 2. Pattern of mold cavity filling: (a) normal filling pattern, (b) jet filling pattern [4, 20, 22] (see text)

Wypełnianie proste zachodzi w warunkach małych i średnich wartości prędkości wtryskiwania. Charakteryzuje się ono tym, że tworzywo ciekłe wpływa łagodnie do gniazda wypełniając je w sposób laminarny. Za przewężką front strumienia tworzywa, w płaszczyźnie gniazda, ma kształt powiększających się półkolistych linii. Tworzywo ulega odkształceniu w wyniku ścinania oraz rozciągania w kierunku obwodowym. Wypełnianie strumieniowe może natomiast wystąpić w przedziale dużej prędkości wtryskiwania. Strumień tworzywa przemieszcza się wówczas gwałtownie aż do zderzenia się ze ścianką gniazda, po czym zaczyna się związać; przepływ tworzywa staje się burzliwy, co sprzyja niekorzystnemu zjawisku powstawania obszarów łączenia strumieni tworzywa w wyprasce.

Podczas przepływu tworzywa w gnieździe formującym można rozróżnić trzy charakterystyczne obszary. Bezpośrednio za przewężką, w obszarze wlotu, występuje przepływ w kierunku promieniowym; tworzywo jest tu odkształcane w wyniku ścinania promieniowego oraz rozciągania obwodowego, stycznego do frontu przepływu [5, 7, 26–29]. W dalszej, dostatecznie oddalonej od przewężki części gniazda, przepływ staje się prostoliniowy, a odkształcanie następuje wskutek ścinania w kierunku przepływu tworzywa. Odkształcenia

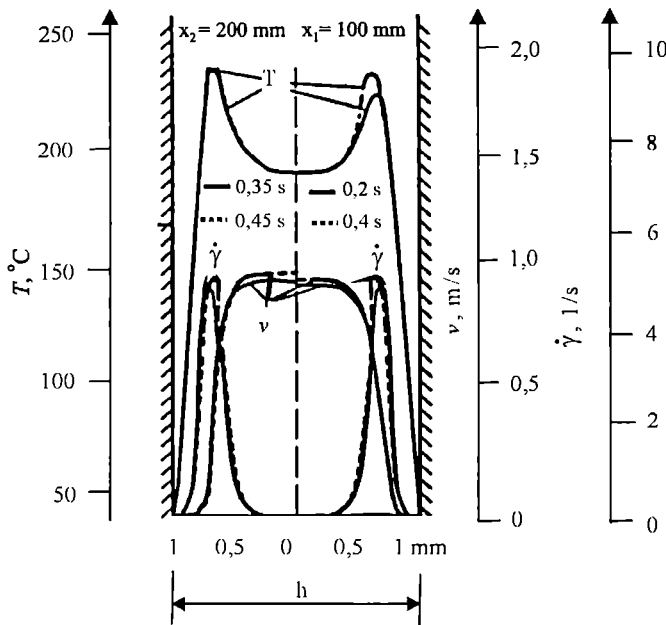
w tym obszarze decydują o orientacji makrocząstek w rdzeniu wypraski oraz wywierają duży wpływ na straty ciśnienia w gnieździe i na czas jego wypełnienia [7, 27]. Na froncie strumienia tworzywa występuje przepływ poprzeczny (wspomniany już efekt „fontannowy”) [3, 5, 14–18]: część tworzywa przemieszcza się na zewnątrz strumienia i osadza na ścianie gniazda. Podczas przepływu poprzecznego makrocząsteczki ulegają rozciąganiu wzdłużnemu i poprzecznemu [14]. Przepływ ten wpływa na jakość i strukturę geometryczną powierzchni wyprasek wtryskowych [4, 27].

W procesie wypełniania gniazda duże znaczenie ma przewodzenie ciepła do ścianek formy, a to ze względu na znacznie większą niż w kanałach doprowadzających powierzchnię styku tworzywa ze ściankami formy o temperaturze niższej. Z kolei, mniejszy jest tutaj udział generowania ciepła na skutek tarcia wewnętrznego, co wynika z mniejszej prędkości ścinania tworzyw w gnieździe [7].

Rozkłady prędkości przepływu, temperatury oraz szybkości ścinania tworzywa w przekroju poprzecznym gniazda formującego w odniesieniu do dwóch punktów położonych w różnej odległości od przewężki przedstawia rys. 3.

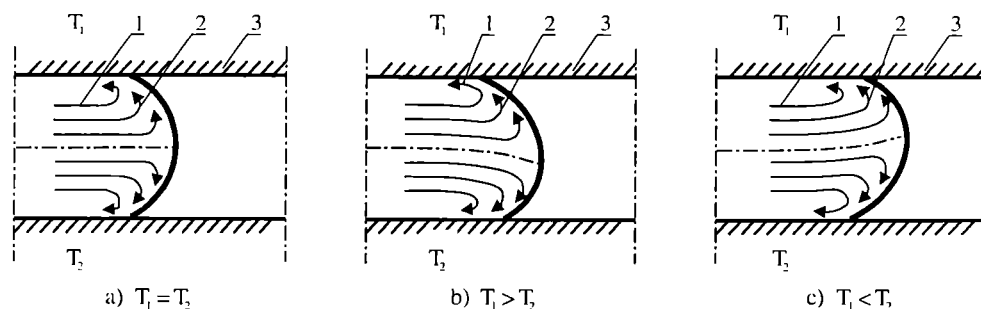
ASYMETRIA TERMOKINETYCZNA PRZEPLÝWU

Przedstawiona charakterystyka przepływu tworzywa w kanałach formy wtryskowej jest słuszną pod warunkiem, że przepływ jest stabilny i symetryczny. Jednak w przypadku, gdy warunki cieplne lub kinetyczne przepływu tworzywa z jednej strony kanału różnią się od odpowiednich warunków po przeciwległej stronie, na przykład wskutek wynikającej z nierównomiernego ochładzania bądź też niejednakowej chropowatości powierzchni ścianek, różnicy temperatury ścianek w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu, to wówczas może wystąpić asymetria termokinetyczna przepływu. Modelowe przykłady takiej asymetrii spowodowanej nierównomiernością ochładzania przedstawia rys. 4. Strumień tworzywa może więc odchyłać się w kierunku



Rys. 3. Rozkłady prędkości przepływu (v_x), temperatury (T) oraz szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$) tworzywa w przekroju poprzecznym gniazda formującego w dwóch punktach znajdujących się w różnej odległości od przewężki: $x_1 = 100$ mm oraz $x_2 = 200$ mm; h — wysokość gniazda [15]

Fig. 3. Polymer flow velocity (v_x), temperature (T) and shear rate ($\dot{\gamma}$) profiles in the mold cross section at two points of different distance from the gate: $x_1 = 100$ mm and $x_2 = 200$ mm; h — cavity thickness [15]



Rys. 4. Modele przepływu tworzywa w kanale: (a) przepływ symetryczny; (b) oraz (c) przepływy asymetryczne; 1 — linie płynięcia, 2 — przepływ poprzeczny, 3 — ścianka kanału (wskazano obszary kanału o temperaturze T_1 oraz T_2) (por. tekst)

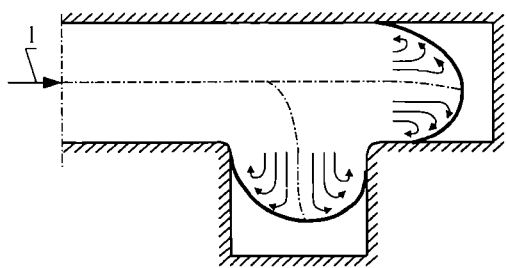
Fig. 4. Models of polymer flow in the channel: (a) symmetrical flow, (b) asymmetrical flow; 1 — flow lines, 2 — crosswise flow, 3 — channel wall (channel areas of T_1 and T_2 temperature are marked) (see text)

ścianki o niższej temperaturze, przy której przepływ tworzywa bardziej ochłodzonego, a więc o mniejszej lepkości, jest mniej intensywny niż przy ścianie o wyższej temperaturze.

Nierównomierna chropowatość powierzchni ścianek, będąca na przykład efektem zużycia ściernego lub adhezyjnego, może natomiast oddziaływać na ilość ciepła generowanego wskutek tarcia tworzywa o ścianki, a także na wartości naprężeń stycznych w warstwie przylegającej do ścianek kanału. Mianowicie, na ścianie o większej chropowatości powierzchni może wystąpić bardziej intensywna adhezja mechaniczna tworzywa do ścianki kanału, będąca skutkiem wnikania tworzywa pomiędzy nierówności. Przepływ tworzywa jest wówczas hamowany w większym stopniu niż na ścianie o gładziej powierzchni, co jest przyczyną zmiany symetrii strumienia tworzywa ciekłego.

Przyczyną niesymetrycznego przepływu może też być niejednorodność struktury oraz właściwości wtryskiwanego tworzywa ciekłego.

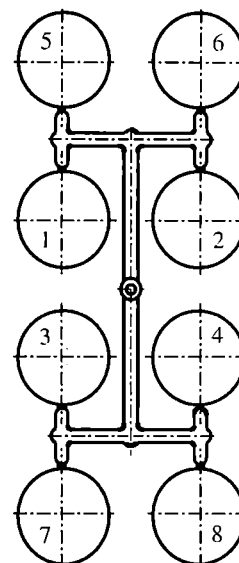
Asymetria termokinetyczna przepływu może wystąpić również wówczas, gdy w kanałach formy następuje zmiana kierunku przepływu tworzywa, np. podczas przejścia z kanału centralnego do kanału doprowadzającego, a także w gniazdach formujących z wstawkami, gniazdach służących do wytwarzania wyprasek z występami, żebrami itp.; ten ostatni przypadek ilustruje rys. 5. Fronty strumienia tworzywa w obydwu częściach gniazda są niesymetryczne, przy czym można się spodziewać pewnego opóźnienia przepływu w odgałęzieniu prostopadłym do kierunku doprowadzania tworzywa w stosunku do przepływu wzdłuż tego kierunku.



Rys. 5. Asymetria termokinetyczna przepływu tworzywa w gnieździe formującym z występem: 1 — kierunek przepływu tworzywa ciekłego

Fig. 5. Thermokinetic asymmetry of polymer flow in the cavity with a boss: 1 — melt flow direction

Na przepływ tworzywa w formie wywiera również wpływ charakter zmian kierunku przepływu, co ma szczególne znaczenie w formach wielogniazdowych, w których strumień tworzywa może zmieniać kierunek nawet kilkakrotnie [30]. Rysunek 6 przedstawia równoległy układ kanałów doprowadzających i gniazd formujących, przy czym długość kanałów doprowadzających

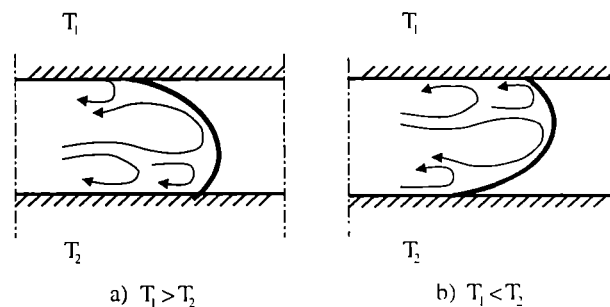


Rys. 6. Równoległy układ kanałów doprowadzających i gniazd formujących w formie wielogniazdowej (por. tekst)

Fig. 6. Symmetrical (parallel) layout of runners and cavities in multicavity mold (see text)

do poszczególnych gniazd jest jednakowa. Pomimo to gniazda oznaczone numerami 1—4 są wypełniane w inny sposób niż gniazda 5—8, co jest spowodowane różną zmianą kierunku przepływu tworzywa w kanałach. Pomimo takiej samej długości drogi przepływu oraz jednakowych wymiarów przekroju poprzecznego kanałów doprowadzających i przewężek, gniazda 1—4 zostaną wypełnione wcześniej, gdyż podczas zmiany kierunku przepływu w jedną stronę (to jest przeciwnie do ruchu wskazówek zegara — efekt „spirali”) tworzywo dopływa do nich łatwiej; inny może też być kształt frontu płynięcia. Efektem nierównomiernego wypełniania gniazd w formach wielogniazdowych są zróżnicowane właściwości wyprasek oraz ich niejednakowa gęstość i masa [31].

Przedstawione modele asymetrii termokinetycznej przepływu są wyidealizowane. Wskutek nierównomier-



Rys. 7. Modele zaburzenia linii płynięcia tworzywa w strumieniu spowodowanego nierównomierną temperaturą formy wtryskowej

Fig. 7. Models of disturbance of polymer flow lines in the stream caused by non-uniform mold temperature

nej temperatury ścianek kanału, a także, na przykład, różnej chropowatości powierzchni, przepływ poprzeczny tworzywa ulega znacznym zmianom. Część strumienia tworzywa wywija się już przed frontem strumienia, a ponadto sam front może być niejednolity, co przedstawia schematycznie rys. 7.

Asymetria termokinetyczna przepływu tworzywa w formie oddziałuje na przebieg procesu wtryskiwania i ma szczególne znaczenie w fazie wypełniania gniazda formującego. Niesymetryczny przepływ tworzywa może prowadzić do nierównomiernego wypełniania gniazda, co w niektórych przypadkach staje się przyczyną anomalii wyprasek, np. obecności widocznych linii przepływu.

ZDERZANIE STRUMIENI TWORZYWA

W warunkach wielopunktowego doprowadzania tworzywa, lub też w przypadku wyprasek o złożonym kształcie geometrycznym, a także gdy występuje zróżnicowana grubość wyprasek bądź też strumieniowe wypełnianie gniazda, powstają obszary łączenia strumieni tworzywa [10, 11, 22, 32]. Zmiany zachodzące w obszarze zderzania się tych strumieni są wynikiem zaburzenia przepływu, które zależy od właściwości reologicznych tworzywa, kształtu geometrycznego gniazda formującego, a przede wszystkim od prędkości przepływu. W wyniku zderzania się strumieni tworzywa przemieszczających się z dużą prędkością na wprost siebie z przeciwnych kierunków, najprawdopodobniej nastę-

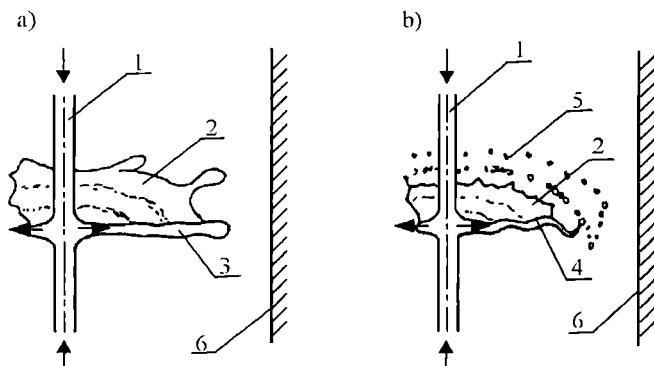
ępuje rozplywanie się tworzywa znajdującego się na froncie strumieni; rozplywanie takie przebiega w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu, co przedstawia modelowo (gdy strumienie mają przekrój kołowy) rys. 8.

W obszarze, w którym następuje zderzenie, powstaje błona obwodowa zmiennej grubości, na której mogą tworzyć się fale o postaci zależnej od prędkości przepływu strumieni tworzywa. Podczas zderzania się strumieni przepływających z mniejszą prędkością (do kilku m/s) błona wykazuje skłonność do tworzenia fal symetrycznych. Charakteryzują się one tym, że wskutek przypadkowych zaburzeń wewnętrznych w tworzywie ciekłym, spowodowanych na przykład zawirowaniem tworzywa w obszarze zderzania, powstają miejsca przeżęzone (rys. 8a). Gdy prędkość zderzających się strumieni jest większa, na błonie tworzą się fale asymetryczne (rys. 8b), związane z oddziaływaniem ciśnienia powietrza znajdującego się w gnieździe formy. Może dochodzić do rozpadu błony i rozpylania tworzywa. Nie powinno się dopuszczać do takiej sytuacji, bowiem wywołuje ona dużą degradację mechaniczną tworzywa.

W gnieździe formy wtryskowej rozplywanie się strumieni tworzywa i tworzenie błony obwodowej jest ograniczone ściankami gniazda. W wyniku takiego przemieszczania się tworzywa powstaje określone ukierunkowanie makrocząsteczek, z których część jest rozciągnięta w kierunku prostopadłym do przepływu, a pozostałe mogą ulegać zaginaniu i zwijaniu. Powstanie nieuporządkowanego stanu makrocząsteczek w obszarze linii łączenia strumieni tworzywa może wpływać na pogorszenie właściwości wyprasek.

PODSUMOWANIE

Wtryskiwanie jest procesem cyklicznym, nieizotermicznym, zmiennym pod względem dynamicznym i kinetycznym. Końcowy efekt procesu to wynik oddziaływania wielu czynników związanych przede wszystkim z przetwarzanym tworzywem, formą wtryskową, wtryskarką, jak również warunkami wtryskiwania. Tworzywo oraz wtryskarka są często czynnikami narzucenymi przez wytwórców i odbiorców wyprasek, natomiast zmiana warunków wtryskiwania, a także konstrukcji i technologii wykonania formy wtryskowej umożliwia sterowanie procesem przepływu tworzywa w kanałach formy w celu uzyskania wyprasek o oczekiwanych właściwościach oraz korzystnej strukturze. Ważnym zagadnieniem jest poznanie możliwości oddziaływania na przebieg zjawisk reologicznych, występujących w strumieniu przetwarzanego tworzywa, zmieniających się w dużym stopniu w zależności od budowy kanałów przepływowych formy wtryskowej oraz budowy gniazda formujących. W związku z tym jest celowe prowadzenie badań — zarówno symulacyjnych, jak i doświadczalnych — ułatwiających analizę symetrii przepływu, a także zjawisk zakłócających tę symetrię



Rys. 8. Schemat promieniowego przemieszczania się tworzywa ciekłego w wyniku czołowego zderzenia strumieni tworzywa przepływających z różną prędkością: (a) małą (do kilku m/s), (b) średnią (do kilkunastu m/s); 1 — strumień tworzywa, 2 — obwodowa błona tworzywa, 3 — fale symetryczne, 4 — fale asymetryczne, 5 — krople tworzywa, 6 — powierzchnia gniazda formy (por. tekst)

Fig. 8. Scheme of liquid polymer radial displacement as a result of frontal weld of polymer streams flowing with different velocities: (a) low (up to a few m/s), (b) medium (up to twenty m/s); 1 — polymer stream, 2 — circumferential polymer film, 3 — symmetrical waves, 4 — asymmetrical waves, 5 — polymer drops, 6 — cavity surface (see text)

oraz ich wpływu na efektywność procesu wtryskiwania ocenianą na podstawie pomiarów właściwości fizycznych i użytkowych wyprasek wtryskowych oraz cech ich powierzchni.

LITERATURA

1. Sterzyński T.: „Interpretacja własności przetwórczych tworzyw termoplastycznych jako czynnik determinujący właściwe prowadzenie procesu wtrysku” w pracy zbiorowej „Wtrysk termoplastów”, wyd. PAN-SIMP, Rydzyna 1983, str. 10.
2. Papathanasiou T. D., Kamal M. R.: *Polym. Eng. Sci.* 1993, **33**, 400.
3. Kim M. S., Lee W. I., Lee J. S.: *Int. Polym. Process.* 1996, **11**, 58.
4. Papathanasiou T. D.: *Int. Polym. Process.* 1996, **11**, 275.
5. Greene J. P.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 590.
6. Lee Ho-S.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 559.
7. Brzoskowski R.: „Zagadnienia płynięcia tworzywa w układzie wlewowym i gnieździe formy” w pracy zbiorowej „Wtrysk termoplastów”, wyd. PAN-SIMP, Rydzyna 1983, str. 88.
8. Szydłowski W., Brzoskowski R.: *Polimery* 1984, **29**, 110.
9. Buchmann M., Theriault R., Osswald T. A.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 667.
10. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT, Warszawa 1984, str. 393.
11. Menges G., Mohren P.: „How to Make Injection Molds”, Hanser Publisher, Monachium 1986, str. 385.
12. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989, str. 460.
13. Menges G., Mohren P.: „Anleitung für den Bau von Spritzgiesswerkzeugen”, Carl Hanser Verlag, Monachium 1974, str. 228.
14. Bown J.: „Injection Moulding of Plastic Components. A Guide to Efficiency, Fault Diagnosis and Cure”, McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, Londyn 1979.
15. Pötsch G., Michaeli W.: „Injection Molding. An Introduction”, Hanser Publishers, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork 1995, str. 195.
16. Sato T., Richardson S. M.: *Polym. Eng. Sci.* 1995, **35**, 850.
17. Henzey M. C., Dealy J. M.: *Int. Polym. Process.* 1997, **12**, 403.
18. Callies H., Kech A., Waschitschek K., Eyerer P.: „Simulation of Injection Moulding Process for Examination of 3D Effects”, The Polymer Processing Society, Fifteenth Annual Meeting, 's Hertogenbosch, (Holandia) 1999, str. 82.
19. Sterzyński T.: *Polimery* 1985, **30**, 343, 409 i 457.
20. „C-MOLD Design Guide. A Resource for Plastics Engineers”, C-MOLD Ithaca, Nowy Jork 1998, str. 336.
21. Sikora R.: „Zjawiska fizyczne w niektórych procesach przetwórstwa tworzyw sztucznych i ich wpływ na właściwości wytworów”, w pracy zbiorowej „Tendencje rozwojowe w technologii maszyn”, Wyd. Uczelniane, Zielona Góra 1979, str. 145.
22. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993, str. 528.
23. Chen B. S., Liu W. H.: *Polym. Eng. Sci.* 1994, **34**, 835.
24. Mennig G.: „Werkzeuge für die Kunststoff-Verarbeitung”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1995.
25. Costa F. S., Ray S., Friedl Ch., Cook P. S., Xu S.: „The Effect of Inertia on Fill Pattern in Injection Molding”, ANTEC 2001, str. 454.
26. Ben Daly H., Sanschagrín B., Nguyen K. T., Cole K. C.: *Polym. Eng. Sci.* 1999, **39**, 1736.
27. Johannaber F.: a) „Kunststoffe Maschiner Führer”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1992, b) „Wtryskarki — Poradnik użytkownika”, Plastech, Warszawa 2000, str. 279.
28. Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, str. 153.
29. Bociąga E.: *Polimery* 2002, **47**, 122.
30. Makowski M.: *TS Raport* 2002, nr 1—2, 36.
31. Sikora R., Bociąga E.: *Przetwórstwo Tworzyw* 2001, nr 7/8, 161.
32. Seldén R.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 205.