

ELŻBIETA BOCIĄGA¹⁾, ROBERT SIKORA²⁾

Kryteria podobieństwa przepływów tworzyw polimerowych w zimnych kanałach form wtryskowych^{*)}

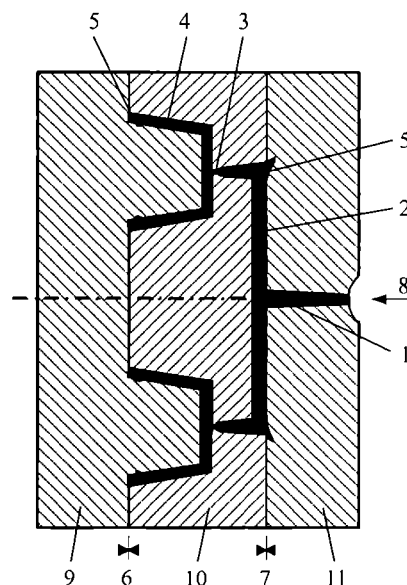
CRITERIA OF SIMILARITY OF PLASTICS FLOW IN COLD MOLD CHANNELS

Summary — Rheological and thermal phenomena (Figs. 2 and 3) play the important roles in the process of molding. So in the model investigations of molding the conditions of similarity, concerning the flows and thermal phenomena, must be fulfilled. Because of this the values of Reynolds's, Peclet's, Prandtl's and Nusselts's criterial numbers, often used in model or actual investigations of thermoplastic polymers flow in the mold channels, have been determined. Significant differences in the values of criterial numbers in a cross-section of a circular channel have been found for PE-HD flow simulation (Fig. 4). These differences should be taken into consideration when applying the criterial numbers for the estimation of similarity conditions of the plastics' flow in the procesing tools channels.

Key words: mold channels, plastics flow, high-density polyethylene, criterial numbers.

W początkowej fazie procesu wypełniania gniazda formującego formy wtryskowej termoplastyczne tworzywo ciekłe, o temperaturze ustalonej w cylindrze układu uplastyczniającego wtryskarki, przepływa przez kanał centralny, kanał doprowadzający i przewężkę, aż do gniazda formującego (rys. 1) [1—6]. Przepływ ten jest zależny od kształtu i wymiarów kanałów oraz przewężki, a także od warunków wtryskiwania (głównie od prędkości i ciśnienia wtryskiwania oraz temperatury tworzywa i formy), jak również od właściwości tworzywa wtryskiwanego (przede wszystkim jego lepkości) [2, 7, 8].

W gnieździe formującym tworzywo jest ochładzane, czemu towarzyszy występowanie skurczu pierwotnego zestalonej wypraski. Dlatego też w fazie docisku do gniazda formującego zostaje wprowadzona dodatkowa ilość tworzywa w celu uzupełnienia powstałego niecałkowitego wypełnienia gniazda spowodowanego tym skurczem. W warunkach wzrastającego ciśnienia w gnieździe i obniżającej się temperatury tworzywa zwiększa się jego gęstość. Faza docisku trwa do chwili zestalenia się tworzywa w przewężce. Wreszcie wypras-



Rys. 1. Przekrój poprzeczny formy wtryskowej trójplytowej: 1 — kanał centralny; 2 — kanał doprowadzający; 3 — przewężka; 4 — gniazdo formujące; 5 — podcięcia w kanale doprowadzającym oraz w gnieździe; 6, 7 — płaszczyzny podziału formy; 8 — kierunek doprowadzania tworzywa z dyszy układu uplastyczniającego wtryskarki; 9, 10, 11 — płyty formy
Fig. 1. Cross-section of three-plate injection mold: 1 — sprue; 2 — runner; 3 — gate; 4 — cavity; 5 — undercuts in the runner and cavity; 6, 7 — parting planes; 8 — direction of the polymer flow from a nozzle of plasticizing unit of molding machine; 9, 10, 11 — mold plates

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją, Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa; e-mail: bociaga@kpts.pcz.czest.pl (autor, do którego należy kierować korespondencję).

²⁾ Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin; e-mail: kptw@archimedes.pol.lublin.pl

^{*)} Wykład wygłoszony w ramach VIII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Darłówek, 9—11 czerwca 2003 r.

ka jest ochładzana do chwili, w której można ją było usunąć z gniazda bez obawy odkształcenia.

Analizę warunków przepływu tworzywa w zimnych kanałach formy oraz w gnieździe formującym, mających istotny wpływ na właściwości i charakterystykę powierzchni wyprasek wtryskowych, często prowadzi się na podstawie badań modelowych. Wyniki badań modelowych mogą jednak być odniesione do obiektów rzeczywistych tylko wówczas, gdy są spełnione warunki podobieństwa, określane za pomocą liczb kryterialnych [9]. W niniejszym artykule podjęliśmy próbę wyznaczenia wartości tych liczb w warunkach przepływu wybranego termoplastu (polietylenu dużej gęstości — PE-HD) w kanałach formy wtryskowej.

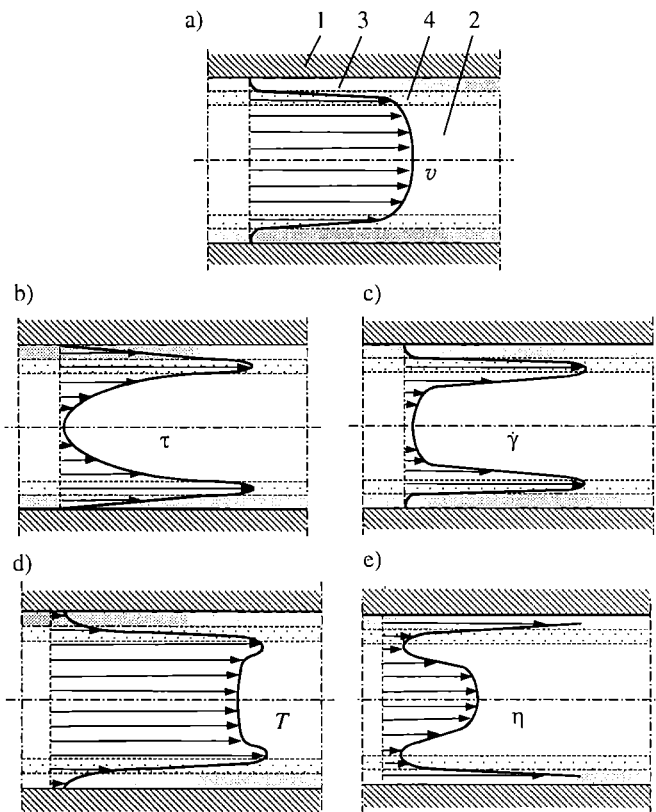
ROZKŁAD WYBRANYCH WIELKOŚCI REOLOGICZNYCH I CIEPLNYCH W PRZEKROJU POPRZECZNYM KANAŁU

Tworzywo ciekłe stykające się ze ściankami kanału przepływowego formy wtryskowej o znacznie niższej temperaturze ulega stopniowemu zestaleniu, tworząc warstwę stałą przylegającą do ścianek kanału; grubość tej warstwy zmniejsza się w kierunku przepływu.

W literaturze [10] pojawia się założenie, że warstwa zestalona ma określoną grubość, należy jednak uwzględnić fakt, że w przepływach rzeczywistych brak jest wyraźnej granicy pomiędzy tworzywem zestalonym i ciekłym. Zawsze występuje tu warstwa przejściowa, pośrednia między stanem stałym i ciekłym — patrz rys. 2. Ze względu na obecność warstwy pośredniej, grubość warstwy zestalonej jest więc umowna. Na budowę i grubość tej warstwy mają wpływ warunki przenoszenia ciepła podczas przepływu tworzywa, zwłaszcza temperatura tworzywa ciekłego i ścianki kanału oraz grubość ścianki kanału, a także prędkość przepływu [2, 3, 6, 11]. Budowa warstwy zestalonej zależy również od warunków występujących na froncie strumienia tworzywa. W wyniku przepływu poprzecznego tworzywa na froncie strumienia [6, 7, 9], przechłodzona warstwa tworzywa przemieszcza się w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu, osadzając się w postaci zestalonej na ściankach kanału [1—3, 12].

Warstwa zestalona występuje w sposób naturalny w kanałach zimnych, a także jest wytwarzana celowo w gorących kanałach izolowanych. Model przepływu płynnego polimeru w kanale prostym przedstawiliśmy w pracy [13].

Rozkład lepkości, prędkości przepływu, naprężenia stycznego, szybkości ścinania oraz temperatury tworzywa zarówno w przekroju poprzecznym, jak i wzdłuż kanału, zależy od wielu czynników, przede wszystkim od różnicy temperatury między ścianką kanału a tworzywem, oraz od współczynnika przewodzenia ciepła, a także od ciepła właściwego, gęstości i ciśnienia tworzywa [8, 12, 14]. Charakterystyczne profile przepływu tworzywa w przekroju poprzecznym kanału prostego przedstawia wspomniany już rys. 2.



Rys. 2. Charakterystyczne profile rozkładu wybranych wielkości reologicznych i cieplnych w przekroju poprzecznym kanału prostego: a) prędkości przepływu (v), b) naprężenia stycznego (τ), c) szybkości ścinania ($\dot{\gamma}$), d) temperatury (T) oraz e) lepkości tworzywa (η); 1 — ścianka kanału, 2 — plastyczny rdzeń ciekłego (przepływającego) tworzywa, 3 — warstwa tworzywa zestalonego, 4 — warstwa przejściowa między stanem stałym i ciekłym

Fig. 2. Characteristic profiles of the distribution of selected rheological and thermal values in a cross section of the plain channel: a) flow velocity (v), b) shear stress (τ), c) shear rate ($\dot{\gamma}$), d) temperature (T) and e) polymer viscosity (η); 1 — channel wall, 2 — plastic core of a liquid (flowing) polymer, 3 — frozen layer, 4 — transient layer between solid and liquid states

Prędkość przepływu (v) polimeru w warstwie zestalonej jest równa zero przy ściance kanału i wzrasta w niewielkim stopniu w miarę zwiększania odległości od jego powierzchni wewnętrznej (rys. 2a). W obszarze, w którym tworzywo przechodzi w stan ciekły prędkość ta znacznie wzrasta, osiągając największą wartość w środku kanału. Między plastycznym ciekłym rdzeniem, przemieszczającym się z prawie stałą prędkością, a warstwą tworzywa zestalonego występuje tzw. strefa poślizgu charakteryzująca się dużym gradientem prędkości. Z powodu znacznej lepkości tworzywa w warstwie zestalonej, największy gradient prędkości przepływu nie występuje dokładnie na granicy tej warstwy, ale w obszarze warstwy przejściowej.

Podczas przepływu tworzywa powstaje w nim określony stan naprężenia stycznego (τ) (rys. 2b). W warst-

wie zestalonej naprężenie to wzrasta gwałtownie wraz z odległością od ścianki kanału. W obszarze położonym blisko granicy między tą warstwą a warstwą przejściową, gdzie występują duże opory przepływu i maksymalny gradient prędkości, naprężenie styczne ma wartość największą. W środkowej części kanału, w której opory przepływu tworzywa są stosunkowo małe, τ przybiera niezbyt duże wartości, a wartość minimalną uzyskuje w osi kanału.

Szybkość ścinania $\dot{\gamma}$ (rys. 2c) w pobliżu ścianek kanału jest prawie równa zero, natomiast największą wartość osiąga w warstwie przejściowej, w niewielkiej odległości od warstwy zestalonej, w obszarze największego gradientu prędkości przepływu. W środku kanału, gdzie prawie nie występuje gradient prędkości przepływu, $\dot{\gamma}$ ma wartość bliską zero.

Na rozkład temperatury (T) w kanale wpływają zwłaszcza dwa przeciwstawne zjawiska, mianowicie przenoszenie ciepła od gorącego tworzywa do ścianki kanału i generowanie ciepła podczas przepływu — wskutek tarcia wewnętrznego w tworzywie oraz tarcia zewnętrznego ciekłego tworzywa o powierzchnię warstwy zestalonej (rys. 2d). W pobliżu ścianki kanału generowanie ciepła w wyniku tarcia jest duże, ale równocześnie znaczna ilość ciepła ulega wymianie na drodze przewodzenia, z tworzywa w kierunku ścianki kanału o niższej temperaturze. Przenoszenie ciepła dominuje tutaj jednak nad generowaniem ciepła, czego efektem jest wyraźne obniżenie temperatury tworzywa i powstawanie warstwy zestalonej. W środku kanału generowanie ciepła w wyniku tarcia jest małe, co powoduje, że w tym obszarze gradient temperatury jest nieznaczny. W warstwie przejściowej przenoszenie ciepła w kierunku promieniowym (prostopadłym do kierunku przepływu) jest niewielkie, natomiast występuje w niej intensywne tarcie spowodowane dużym gradientem prędkości przepływu. Przyczynia się to do znacznego wzrostu temperatury tworzywa w tej warstwie.

Nierównomierne warunki przepływu tworzywa w przekroju poprzecznym kanału są przyczyną zmian jego lepkości (η) (rys. 2e). Przy ściance kanału, w obszarze najbardziej intensywnej wymiany ciepła między gorącym tworzywem a ścianką kanału o niższej temperaturze, lepkość ma wartość największą, która w przypadku większości tworzyw termoplastycznych wynosi ok. 10^7 Pa · s [10]. W osi kanału gdzie tworzywo znajduje się w stanie ciekłym, η osiąga zazwyczaj wartość ok. 10^3 Pa · s. Najmniejsza wartość η (ok. 10 Pa · s) występuje w obszarze o najwyższej temperaturze i największej szybkości ścinania — w pobliżu warstwy zestalonej i warstwy przejściowej. Lepkość tworzywa w kanale przepływowym wywiera istotny wpływ na przebieg procesu wypełniania gniazd formujących narzędzi przetwórczych, zwłaszcza na orientację makrocząsteczek, zatem na właściwości kształtowanych wytworów i na ich anizotropię.

W ciągu całego cyklu procesu wtryskiwania następuje przenoszenie ciepła pomiędzy tworzywem, formą, wtryskarką i otoczeniem, przy czym ciepło może być przeniesione na drodze przewodzenia, konwekcji i promieniowania [2, 3, 15]. W procesie wtryskiwania ważne jest przenoszenie ciepła między ciekłym polimerem a powierzchnią przez niego opływającą. Podczas ruchu ciekłego tworzywa w jego głębszych warstwach wymiana ciepła następuje głównie w wyniku konwekcji, natomiast w strefie przylegającej do ścianki — przewodzenia. Przenoszenie ciepła na drodze promieniowania odgrywa tutaj mniejszą rolę [2, 4].

W procesie wtryskiwania występuje nieustalone przewodzenie ciepła w trakcie zarówno nagrzewania tworzywa w układzie uplastyczniającym, jak i jego cyklicznego nagrzewania i ochładzania w formie. Rozpatrując zjawiska cieplne zachodzące w formie wtryskowej należy oddzielić procesy przebiegające w kanale centralnym, kanałach doprowadzających, przewężce oraz gnieździe formującym. W analizie przepływu tworzywa w gnieździe formującym najczęściej zakłada się, że w płaszczyźnie wypraski równoległej do kierunku przepływu tworzywa następuje przenoszenie ciepła na drodze konwekcji, natomiast w kierunku jej grubości — w wyniku przewodzenia [16, 17]. W fazie wypełniania gniazda, ze względu na dużą prędkość przepływu tworzywa, udział ciepła konwekcji jest znacznie większy niż wynikający z przewodzenia. W fazie docisku, w której prędkość przepływu jest nieduża lub wręcz znikoma, dominującą rolę w przenoszeniu ciepła odgrywa natomiast przewodzenie [18, 19].

WYKORZYSTANIE LICZB KRYTERIALNYCH

W procesie wtryskiwania ważną rolę odgrywają zjawiska reologiczne i cieplne, w związku z czym w badaniach modelowych wtryskiwania muszą być spełnione warunki podobieństwa w zakresie tych właśnie zjawisk.

We wcześniejszej publikacji [9] scharakteryzowaliśmy liczby kryterialne, najczęściej stosowane w analizie procesu przepływu tworzyw polimerowych w kanałach narzędzi przetwórczych. Przypominamy, że są to następujące liczby: Reynoldsa (Re), Webera (We), Grashofa (Gr), Fouriera (Fo), Pecleta (Pc), Prandtla (Pr), Nusselta (Nu), Graetza (Gz), Brinkmana (Br) i Biota (Bi).

W niniejszej pracy podjęliśmy próbę wyznaczenia wartości niektórych liczb kryterialnych (Re , Pe , Pr , Nu) wykorzystywanych w przypadku przepływu tworzywa termoplastycznego w kanale formy wtryskowej. Wyznaczając wspomniane liczby uwzględnia się właściwości tworzywa ciekłego, takie jak gęstość (ρ), lepkość (η) oraz dyfuzyjność cieplną (a), a także warunki przepływu określone jego prędkością. Wartości tych parametrów zmieniają się w przekroju kanału w zależności od temperatury oraz szybkości ścinania w określonym zakresie, co można wyrazić następującymi zależnościami ogólnymi:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(T) & (1) \\ \eta &= \eta(T, \dot{\gamma}) & (2) \\ a &= a(T) & (3) \\ v &= v(r) & (4) \end{aligned}$$

gdzie: r — promień kanału.

Obliczenie liczb kryterialnych w określonych warunkach przepływu wiąże się więc z koniecznością ustalenia właściwych wartości v , ρ , η i a tworzywa. Wprawdzie w pracach Kembłowskiego i wsp. [20–22] podano, że w obliczeniach wystarczy przyjąć średnią liniową prędkość przepływu, jednak według nas ważnym zagadnieniem jest uwzględnienie również zmian gęstości i lepkości ciekłego tworzywa w przekroju kanału. Różnice ich wartości są znaczne, na przykład gęstość PE-HD zmienia się od ok. $0,720 \text{ g/cm}^3$ w temp. $260 \text{ }^\circ\text{C}$ do $0,956 \text{ g/cm}^3$ w temp. $20 \text{ }^\circ\text{C}$, natomiast η wynosi ok. $30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ w warunkach występujących w pobliżu warstwy zastalanej ($\dot{\gamma} = \text{ok. } 7000 \text{ s}^{-1}$, $T = 260 \text{ }^\circ\text{C}$), a ok. $800 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ w odniesieniu do bardzo małej szybkości ścinania i niższej temperatury, czyli w środku kanału [7]. Zatem rozwijając tezę Kembłowskiego i wsp. wydaje się słuszne przyjęcie do obliczeń liczb kryterialnych wartości średniej gęstości, lepkości oraz dyfuzyjności cieplnej tworzywa.

PRZYKŁAD WYZNACZANIA LICZB KRYTERIALNYCH — OBLICZENIA WŁASNE

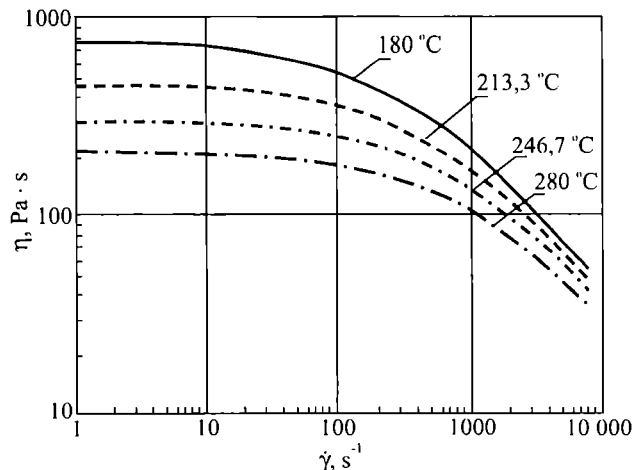
Uwzględniając powyższe rozumowanie wykonaliśmy na przykładzie PE-HD obliczenia pozwalające na ocenę zmiany liczby Reynoldsa, Prandtla, Pecleta oraz Nusselta w przekroju poprzecznym kanału. Posłużyliśmy się do tego celu PE-HD firmy Dow Chemicals o symbolu 10062E. Polietylen 10062E charakteryzuje się następującymi właściwościami [7, 8, 15, 23]:

- gęstość (ρ) w temp. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ — $0,956 \text{ g/cm}^3$,
- współczynnik sprężystości przy rozciąganiu (E_t) — 2600 MPa ,
- ciepło właściwe (c_p) w temp. $210 \text{ }^\circ\text{C}$ — $3794 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$,
- dyfuzyjność cieplna (a) w temp. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ — $2,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,
- współczynnik przewodzenia ciepła (λ) w temp. $210 \text{ }^\circ\text{C}$ — $0,284 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,
- wskaźnik szybkości płynięcia (MFR — $190 \text{ }^\circ\text{C}/5,0 \text{ kg}$) — $27 \text{ g}/10 \text{ min}$.

Krzywe płynięcia tego polietylenu w różnej temperaturze przedstawia rys. 3.

Założyliśmy, że przepływ odbywa się przez kanał o przekroju kołowym średnicy $4,6 \text{ mm}$ i długości 100 mm , w następujących warunkach:

- założona temperatura polietylenu w pobliżu warstwy zastalanej — $260 \text{ }^\circ\text{C}$,
- średnia temperatura polietylenu wpływającego do kanału — $210 \text{ }^\circ\text{C}$,
- temperatura ścianki kanału — $40 \text{ }^\circ\text{C}$,
- średnia prędkość przepływu — 2 m/s .



Rys. 3. Krzywe płynięcia PE-HD typu 10062E w różnej temperaturze

Fig. 3. PE-HD type 10062E flow curves at various temperatures

W obliczeniach uwzględniliśmy zmianę prędkości przepływu w zakresie od $v_{\min} = 0$ (przy ściance kanału) do $v_{\max} = 4 \text{ m/s}$ (w środku kanału).

Gęstość polietylenu wynosiła odpowiednio: w temp. $260 \text{ }^\circ\text{C}$ — $0,720 \text{ g/cm}^3$, w temp. $210 \text{ }^\circ\text{C}$ — $0,760 \text{ g/cm}^3$ i w temp. $40 \text{ }^\circ\text{C}$ — $0,920 \text{ g/cm}^3$.

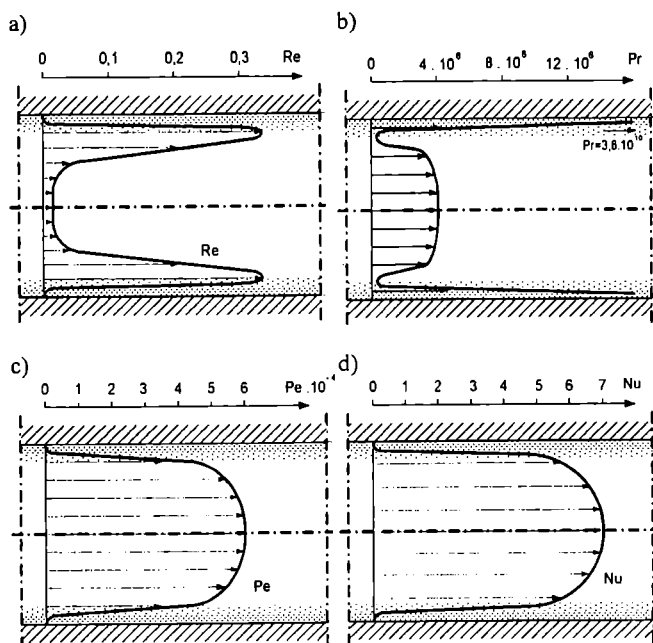
Wartości lepkości ciekłego tworzywa odpowiadające szybkości ścinania w danym obszarze kanału przepływowego, wyznaczonej na podstawie komputerowych badań symulacyjnych [7, 8], określono korzystając z rys. 3.

Określając dyfuzyjność cieplną oparliśmy się na wynikach badań przedstawionych w literaturze, w których wykazano zmniejszanie się tej właściwości tworzywa ze wzrostem temperatury [11] oraz jej zwiększanie się ze wzrostem stopnia orientacji makrocząsteczek [24].

Wyniki obliczeń liczb kryterialnych w przekroju poprzecznym kanału przepływowego zawiera rys. 4. Przy ściance kanału, gdzie prędkość przepływu jest równa zero, Re (rys. 4a) przybiera również wartość zerową, natomiast wartość największa (Re ok. $0,33$) występuje w pobliżu warstwy zastalanej, w obszarze największej szybkości ścinania i najwyższej temperatury tworzywa. W środku kanału wartość tej liczby zmniejsza się do $0,014$. Bardzo małe wartości Re wskazują na zdecydowanie laminarny charakter przepływu tworzywa w kanałach formy wtryskowej.

Liczba Pr (rys. 4b) uwzględniająca tylko właściwości tworzywa, ma największą wartość ($3,8 \cdot 10^{10}$) przy ściance kanału, gdzie charakteryzuje się ono dużą lepkością. W obszarze największych wartości $\dot{\gamma}$, w którym tworzywo ma najmniejszą lepkość, wartości liczby Prandtla są o wiele rzędów mniejsze.

Z rozkładu liczby Pecleta (rys. 4c) widać, że przy ściance kanału ($v = 0$) również liczba ta, podobnie jak Re , ma wartość zerową. W miarę zwiększania odległości od



Rys. 4. Zmiana liczb kryterialnych Reynoldsa (a), Prandtla (b), Pecleta (c) i Nusselta (d) w przekroju poprzecznym kołowego (średnicy 4,6 mm) kanału przepływowego formy wtryskowej

Fig. 4. Change of criterial numbers: Reynolds's (a), Prandtl's (b), Peclet's (c) and Nusselt's (d) one in the cross-section of the mold circular channel ($\varnothing = 4.6 \text{ mm}$)

ścianki liczba Pecleta jednak wzrasta, osiągając największą wartość w osi kanału. Rozkład liczby Nusselta ma podobny przebieg (rys. 4d), z tym że różnica pomiędzy skrajnymi wartościami każdej z tych liczb jest kilkukrotna.

Stwierdziliśmy więc, że określając wartości liczb kryterialnych należy brać pod uwagę zmiany zachodzące w przekroju poprzecznym kanału — zarówno warunków przepływu, jak i wielkości charakteryzujących właściwości tworzywa. Podczas przepływu ciekłego tworzywa w kanałach formy wtryskowej zmiany te są bardziej istotne niż na przykład w odniesieniu do przepływu wody w kanałach ze względu na dużą lepkość tego pierwszego i znaczną różnicę temperatury pomiędzy gorącym tworzywem a zimną formą oraz związane z tym zjawisko powstawania warstwy zestalonej przy ściance kanału, której grubość zmienia się podczas przepływu.

PODSUMOWANIE

W badaniach przepływu tworzywa w kanałach przepływowych form wtryskowych należy zwrócić uwagę na to, że charakterystyczne profile przepływu tworzywa zmieniają się z upływem czasu trwania tego procesu ze względu na ciągłą zmianę grubości warstwy zestalonej oraz przejściowej. Ochładzanie tworzywa powoduje powiększenie się grubości tych warstw, co przyczynia się

do stopniowego zmniejszania pola przekroju poprzecznego kanału przez który odbywa się przepływ, a w wyniku tego zjawiska zwiększa się ciśnienie, prędkość przepływu, naprężenie styczne oraz szybkość ścinania tworzywa.

Większe opory przepływu w zmniejszonym przekroju poprzecznym kanału powodują bardziej intensywne tarcie wewnętrzne w tworzywie oraz zewnętrzne tworzywa o powierzchnię zestalonej warstwy, co z kolei wywołuje wzrost jego temperatury. Ekstremalne wartości naprężenia stycznego, szybkości ścinania, temperatury oraz lepkości tworzywa zwiększają się i przesuwają bliżej osi kanału. Szybkość występowania tych zmian decyduje o właściwościach tworzywa wypełniającego gniazdo formujące formy wtryskowej, a dzięki temu i o właściwościach uzyskiwanych wyprasek.

Profile charakterystyczne przepływu tworzywa w kanałach form wtryskowych zmieniają się w ramach każdego cyklu wtryskiwania. W fazie wtrysku prędkość przepływu tworzywa oraz jego temperatura są większe, natomiast gęstość i lepkość mniejsze niż w fazie docisku, co uwidacznia się także w rozkładzie liczb kryterialnych w przekroju poprzecznym kanału. Należy ponadto uwzględnić fakt, że omawiane profile przepływu odnoszą się do kanałów zimnych. W formach z kanałami gorącymi warunki przepływu tworzywa są odmienne, a więc i rozkład wszystkich wielkości charakteryzujących przepływ będzie inny niż w kanałach zimnych.

Obliczone przykładowe wartości liczb kryterialnych mogą zostać wykorzystane do określenia warunków podobieństwa przepływu tworzywa w kanałach formy rzeczywistej i modelowej. Możliwe jest również wyznaczenie liczb kryterialnych w przypadku różnych warunków wtryskiwania. Znajomość wartości tych liczb umożliwia właściwe zaprojektowanie, zaplanowanie i przeprowadzenie badań modelowych, jednak zawsze należy uwzględnić zmianę ich wartości w przekroju poprzecznym kanału przepływowego.

LITERATURA

1. Menges G., Mohren P.: „How to Make Injection Molds”, Hanser Publisher, Monachium 1986, str. 385.
2. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT, Warszawa 1984, str. 393.
3. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989, str. 460.
4. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993, str. 528.
5. Zawistowski H., Zięba S.: „Ustawianie procesu wtrysku”, Plastech, Warszawa 1995, str. 140.
6. Pötsch G., Michaeli W.: „Injection Molding. An Introduction”, Hanser Publishers, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork 1995, str. 195.
7. Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”

- Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, str. 153.
8. Bociąga E.: *Polimery* 2002, 47, 122.
 9. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 753.
 10. Kennedy P.: „Flow Analysis of Injection Molds”, Hanser Publishers, Monachium—Wiedeń—Nowy Jork 1995, str. 237.
 11. Tadmor Z., Gogos C. G.: „Principles of Polymer Processing”, Wiley, Nowy Jork—Brisbane—Chichester—Toronto 1979, str. 736.
 12. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, 48, 100.
 13. Sikora R., Bociąga E.: „Characteristic Profiles of Polymer Flow in Plain Channels” w ramach The Polymer Processing Society, Nineteenth Annual Meeting, Melbourne, Australia 2003.
 14. Bociąga E., Jaruga T.: „Analiza przepływu tworzywa w gniazdach form jedno- i wielogniazdowych” w pracy zbiorowej: „Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002, str. 223.
 15. Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 501.
 16. Abbes B., Ayad R., Prudhomme J.-C., Onteniente J.-P.: *Polym. Eng. Sci.* 1998, 38, 2029.
 17. Papathanasiou T. D., Kamal M. R.: *Polym. Eng. Sci.* 1993, 33, 400.
 18. Chiang H. H., Hierber C. A., Wang K. K.: *Polym. Eng. Sci.* 1991, 31, 116 i 125.
 19. Davidoff A., Leclere F.: „Symulacja pełnego cyklu wtryskiwania tworzyw sztucznych — *Strimflow*” w pracy zbiorowej: „Postęp w przetwórstwie tworzyw termoplastycznych”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1995, str. 279.
 20. Kemblowski Z., Michałowski S., Strumillo Cz., Zarzycki R.: „Podstawy teoretyczne inżynierii chemicznej i procesowej”, WNT, Warszawa 1985, str. 524.
 21. Kemblowski Z.: „Reometria płynów nienewtonowskich”, WNT, Warszawa 1973, str. 187.
 22. Ferguson J., Kemblowski Z.: „Reologia stosowana płynów”, Wyd. Marcus, Łódź 1995, str. 321.
 23. Gdula S. J.: „Podstawy techniki cieplnej”, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1976, str. 492.
 24. Sterzyński T.: *Polym. Eng. Sci.* 1987, 27, 906.