

ELŻBIETA BOCIĄGA

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

Doświadczalne metody badania przepływu tworzywa w kanałach form wtryskowych^{*)}

Streszczenie — Omówiono znaczenie badań zmierzających do poznania zjawisk zachodzących podczas przepływu tworzywa w formie, podkreślając przy tym konieczność prowadzenia prac o charakterze zarówno symulacyjnym, jak i doświadczalnym. Przedstawiono obszerną (obejmującą opisy postępowania oraz porównanie zalet i wad) charakterystykę kilku wykorzystywanych w tym celu sposobów eksperymentalnych, mianowicie zastosowanie form z przezroczystymi (szklanymi) ściankami, metodę krótkich wtrysków, metodę magnesowania tworzywa a także zastosowanie barwnika lub napełniacza płytkowego jako znacznika linii przepływu tworzywa. Dużo miejsca poświęcono wynikom własnych prac nad nową metodą badania przepływu tworzywa w formie wtryskowej, polegającą na pominięciu fazy docisku podczas wtryskiwania, dzięki czemu uzyskuje się wypraski z widocznymi na ich powierzchni liniami przepływu materiału. W jej realizacji nie potrzeba stosować specjalnego oprzyrządowania, a jedyny wymóg to właściwy wybór warunków wtryskiwania. W szczególności, temperatura formy powinna być niższa od zalecanej w odniesieniu do danego tworzywa.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, przepływ tworzywa w formie, doświadczalne metody badania przepływu.

EXPERIMENTAL METHODS OF INVESTIGATIONS OF POLYMER FLOW IN INJECTION MOLD CHANNELS

Summary — An importance of the studies leading to knowledge concerning the phenomena, which take place during the polymer flow in the mold, has been discussed. The necessity of research works of both characters – simulations and experimental ones – was stressed. The wide characteristics of several experimental methods (including descriptions of procedures and comparison of advantages and drawbacks) were presented, namely: transparent (glass inserted) molds, short shot method, a method of polymer magnetization or application of a dye or lamellar filler as flow line markers. The results of own research concerning the developing of a new method of investigation of polymer flow in the mold were presented. This new method is based on injection molding of a polymer without holding phase (Fig. 11–14) what let obtain the moldings with flow lines visible on the surface. Special equipment is not needed. The only requirement is the proper choice of injection molding conditions. Especially the temperature of the mold should be lower than recommended for the polymer used.

Key words: injection moldings, polymer flow in the mold, experimental methods of flow investigations.

Przepływ ciekłego tworzywa w formie wtryskowej — przez kanał centralny, kanały doprowadzające przewężkę do gniazda formującego (lub gniazd w przypadku form wielogniazdowych) — jest przepływem nieustalonym i nieizotermicznym. Zależy on od wielu czynników związanych przede wszystkim z rodzajem przetwarzanego tworzywa i formy wtryskowej, typem wtryskarki oraz od warunków wtryskiwania [1–6]. Rodzaj, jak również typ wtryskarki są zazwyczaj narzuca-

ne przez wytwórców i odbiorców wyprasek, natomiast zmiana warunków wtryskiwania a także budowy i sposobu wykonania formy wtryskowej umożliwiają przetwórcy sterowanie procesem przepływu tworzywa w kanałach formy w celu uzyskania wyprasek o pożądanej strukturze, właściwościach, kształcie i wymiarach oraz stanie powierzchni. Przepływ tworzywa w kanałach doprowadzających i przewężkach powinien odbywać się w sposób zapewniający jego laminarny charakter, całkowite wypełnienie gniazda formującego, a w przypadku form wielogniazdowych — równoczesne wypełnianie wszystkich gniazd w celu uzyskania powtarzalnych wyprasek dobrej jakości w połączeniu

^{*)} Artykuł zawiera treść wystąpienia wygłoszonego w ramach IX Profesorskich Warsztatów Naukowych, Pieczęyska koło Bydgoszczy, 11–14 czerwca 2006 r.

z możliwie niewielkim spadkiem ciśnienia i temperatury podczas procesu [1, 3, 5].

Ważnym zagadnieniem jest sposób i kolejność wypełniania tworzywem poszczególnych obszarów w gnieździe formującym. Najkorzystniej byłoby, aby wszystkie miejsca były wypełniane jednocześnie, co jest jednak trudne, a najczęściej niemożliwe do zrealizowania. Równomierne wypełnianie gniazda formującego zależy przede wszystkim od budowy układu przepływowego formy (liczby i umiejscowienia miejsc wtryskiwania tworzywa a także kształtu oraz wymiarów kanałów doprowadzających i przewęzek), dokładności wykonania tego układu oraz kształtu i wymiarów wypraski (w tym wartości i zróżnicowania grubości jej ścianek).

Niekiedy konieczne jest specjalne sterowanie przepływem tworzywa w gnieździe. Odnosi się to, na przykład, do wyprasek z obszarami łączenia strumieni tworzywa, kiedy to przepływ tworzywa w gnieździe powinien odbywać się tak, aby obszary te nie znajdowały się w miejscach obciążonych podczas użytkowania wyprasek bądź też, ze względów estetycznych, w miejscach widocznych.

Poznanie możliwości oddziaływania na przebieg zjawisk reologicznych występujących w strumieniu przetwarzanego ciekłego tworzywa ma duże znaczenie praktyczne zarówno ze względów ekonomicznych (zmniejszenie strat tworzywa, skrócenie czasu trwania cyklu wtryskiwania), jak i wymagań dotyczących jakości wyprasek wtryskowych. Spośród eksperymentalnych możliwości badania przepływu tworzywa w formie można wyróżnić następujące sposoby:

- zastosowanie form z przezroczystymi (szklanymi) ściankami [7—19],
- metoda krótkich wtrysków [4, 20—25],
- metoda magnesowania tworzywa [26],
- zastosowanie barwnika jako znacznika linii przepływu tworzywa [21, 26—28],

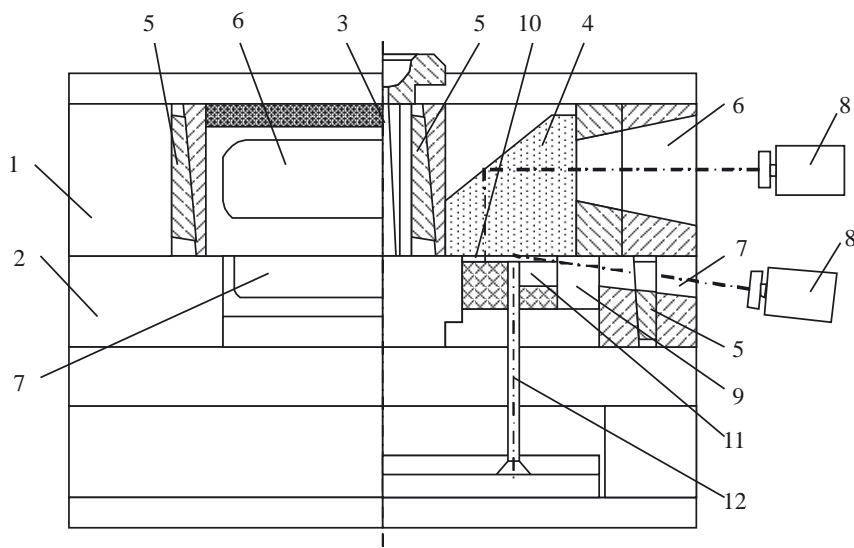
- zastosowanie napełniacza płytkowego jako znacznika linii przepływu tworzywa [24, 29—32],
- wtryskiwanie z pominięciem fazy docisku [33].

Dalszy tekst artykułu jest poświęcony omówieniu tych właśnie sposobów.

FORMY Z PRZEZROCZYSTYMI (SZKLANYMI) ŚCIANKAMI

Badania przepływu tworzywa w kanałach formy wtryskowej z wkładkami wykonanymi z przezroczystego materiału (najczęściej specjalnego szkła) są opisywane w literaturze już od ponad 50 lat (wg [7]). Wkładki takie wykorzystuje się najczęściej do analizy przepływu tworzywa w formach z gniazdami formującymi o złożonej budowie [8—11]. W formach wielogniazdowych metodę tę zastosowano do oceny równomierności wypełniania gniazd [12]. Formy ze szklanymi ściankami lub całymi szklanymi wkładkami formującymi użyto w badaniach procesu mikrowtryskiwania [13—15] oraz wytwarzania wyprasek cienkościennych w procesie wtryskiwania z bardzo dużą prędkością [16, 17]. Badano również przepływ tworzyw napełnionych włóknem [18] a także możliwość wystąpienia zjawiska przypalania tworzywa spowodowanego sprężaniem gazu w gnieździe formującym [19].

Znane są różne rozwiązania konstrukcyjne form z przezroczystymi ściankami, np. formy z pryzmatycznymi wstawkami szklanymi, z trójwymiarową wizualizacją przepływu (rejestracja zjawisk równocześnie z dwóch kierunków), formy z przeciwświetleniem oraz z wykorzystaniem laserowego światła spolaryzowanego (wg [7]). Zjawiska zachodzące w formie wtryskowej są rejestrowane za pomocą kamer charakteryzujących się dużą szybkością rejestracji obrazów. Na rysunku 1 przedstawiono przykład formy wtryskowej z wstawkami szklanymi (jedną pryzmatyczną), z możliwością trój-



Rys. 1. Forma z wstawkami szklanymi z trójwymiarową rejestracją obrazów: 1 — podzespół nieruchomy formy, 2 — podzespół ruchomy formy, 3 — kanał wlewowy, 4 — pryzmatyczna wstawka szklana, 5 — klin, 6 — okienko A, 7 — okienko B, 8 — kamera wideo, 9 — wstawka szklana boczna, 10 — gniazdo formujące, 11 — szklana ścianka formy, 12 — wypychacz [9]

Fig. 1. Glass-inserted mold with three-dimensional images' recording: 1 — stationary part of mold, 2 — movable part of mold, 3 — sprue, 4 — prism glass insert, 5 — wedge, 6 — window A, 7 — window B, 8 — video camera, 9 — side glass insert, 10 — cavity, 11 — mold glass wall, 12 — ejector [9]

wymiarowej rejestracji zjawisk w formie za pomocą dwóch kamer wideo [9]. Obszar obserwacji ma wymiary 180×50 mm, a szybkość rejestracji wynosi 200 kadrów/s.

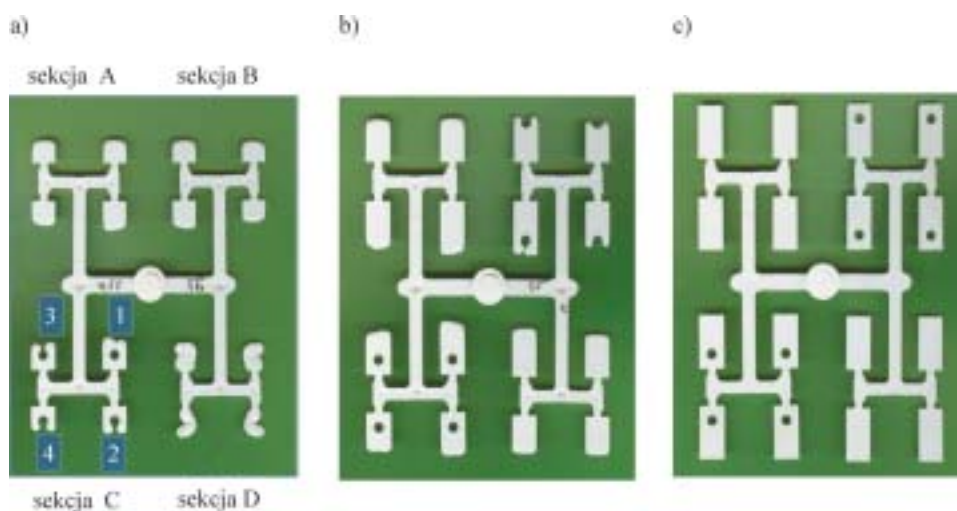
Ciągle udoskonalane metody badania przepływu tworzywa w formie wtryskowej ze szklanymi ściankami pozwalają wprowadzić na bezpośrednią obserwację i rejestrację zjawisk występujących w kanałach formy, ich główną wadą jest jednak złożona budowa stanowiska badawczego. Ponadto, warunki przepływu tworzywa mogą być inne niż w formach stalowych ze względu na różną przewodność cieplną szkła i stali.

METODA KRÓTKICH WTRYSKÓW

Metoda ta polega na wtryskiwaniu tworzywa do formy z zastosowaniem czasu wtrysku krótszego od czasu

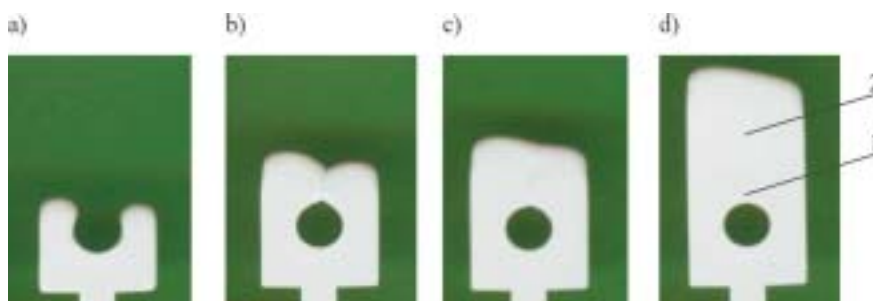
niezbędnego do całkowitego wypełnienia gniazda formującego [4, 20—25, 34]; nie występuje przy tym faza docisku. Pozostałe warunki wtryskiwania, mianowicie temperatura wtryskiwanego tworzywa, temperatura formy i prędkość wtryskiwania, mogą być ustalone i zmieniane w zależności od rodzaju tworzywa oraz celu badań.

W badaniach prowadzonych metodą krótkich wtrysków jest możliwa ocena przemieszczania się frontu strumieni tworzywa w kanałach doprowadzających oraz wypełniania gniazd formujących. Rysunek 2 pokazuje stopniowe wypełnianie tworzywem ABS gniazd w formie wielogniazdowej w warunkach różnych wartości czasu wtrysku. Jest to doświadczalna forma 16-gniazdowa, w której znajdują się cztery sekcje z gniazdami o różnym kształcie geometrycznym w każdej sekcji, sto-



Rys. 2. Wypraski z tworzywa ABS uzyskane w formie 16-gniazdowej metodą krótkich wtrysków w następujących stałych warunkach: prędkość wtryskiwania 55 mm/s, temperatura formy 40 °C, temperatura wtryskiwanego tworzywa 210 °C; czasy wtrysku: a) 0,55 s, b) 0,63 s, c) 0,70 s (dalsze objaśnienia w tekście)

Fig. 2. ABS moldings prepared in 16-cavity mold by short shot in the following constant conditions: injection velocity 55 mm/s, mold temperature 40 °C, injected polymer temperature 210 °C. Injection times: a) 0.55 s, b) 0.63 s, c) 0.70 s (further explanations in the text)



Rys. 3. Asymetria frontu strumienia tworzywa wypełniającego gniazdo formujące nr 1 w sekcji C z rys. 2 oraz powstawanie obszarów prostopadłego (1) i równoległego (2) łączenia strumieni tworzywa w wypraskach z ABS; czasy wtrysku: a) 0,52 s, b) 0,55 s, c) 0,58 s, d) 0,63 s, warunki stałe jak na rys. 2

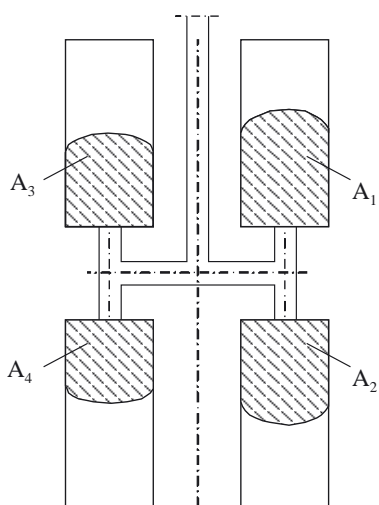
Fig. 3. Asymmetry of melt flow front filling the cavity No. 1 of section C in Fig. 2, and formation of the regions of perpendicular (1) and parallel (2) joining of polymer streams (weld and meld lines) in ABS moldings. Injection times: a) 0.52 s, b) 0.55 s, c) 0.58 s, d) 0.63 s. Constant conditions as in Fig. 2

sowana we wcześniejszych naszych badaniach [20–23]. Widoczne jest nierównomierne wypełnianie poszczególnych gniazd, zależne od sposobu zmiany kierunku przepływu tworzywa w kanałach doprowadzających. Gniazda oznaczone numerem 1 są wypełnione szybciej niż pozostałe, przy czym kolejność ich wypełniania została oznaczona numerami 2, 3 i 4. Efektem nierównomiernego wypełniania gniazd formujących jest zróżnicowana masa wyprasek.

Na rysunku 3 przedstawiono etapy wypełniania ciekłym tworzywem gniazda formującego 1 w sekcji C z rys. 2. Widoczna jest asymetria frontu strumienia (szybszy przepływ z lewej strony wypraski) wynikająca z warunków przepływu tworzywa w kanałach doprowadzających i w przewężkach, a niekiedy również z nierównomiernego ochładzania formy. Można zaobserwować zjawisko powstawania obszarów łączenia strumieni tworzywa, przy czym wyróżnia się dwa rodzaje tych obszarów, mianowicie obszar prostopadłego zderzenia strumieni bezpośrednio za trzpieniem kształtującym otwór (ang. *weld line*) oraz obszar równoległego łączenia strumieni z przepływem równoległym strumieni względem siebie (ang. *meld line*). Linie łączenia strumieni tworzywa są odchyłone od osi symetrii wypraski (por. zwłaszcza rys. 3b), co jest skutkiem asymetrii frontu strumienia tworzywa i szybszym jego przepływem z jednej strony gniazda.

W opisywanej metodzie krótkich wtrysków jest możliwa ilościowa ocena równomierności wypełnienia gniazd formujących w formach wielogniazdowych za pomocą wskaźnika wypełnienia a określonego zależnością

$$a = \frac{A_n}{A_{sr}} \quad (1)$$



Rys. 4. Schemat określania równomierności wypełnienia gniazd formujących w formie wielogniazdowej; $A_1 \div A_4$ — pole powierzchni wyprasek z poszczególnych gniazd

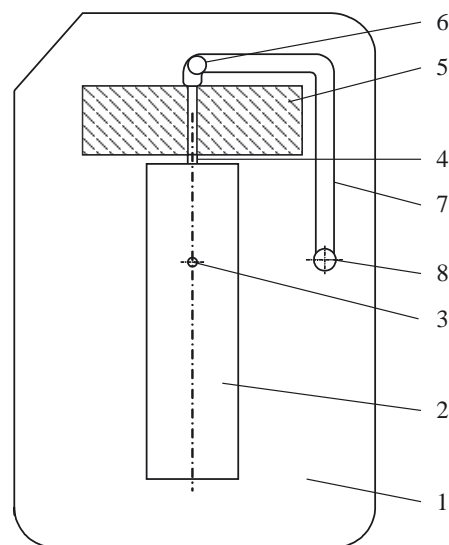
Fig. 4. Scheme of determination of non-uniform filling of mold cavities in multi-cavity mold; $A_1 \div A_4$ — areas of parts from particular cavities

gdzie: A_n — pole powierzchni wypraski z gniazda „n”, A_{sr} — obliczona średnia arytmetyczna pól powierzchni wyprasek z wszystkich gniazd (przy czym pole powierzchni wypraski określa się w płaszczyźnie pokazanej na rys. 4).

Wskaźnik wypełnienia $a = 1$ jest granicznym wskaźnikiem, określającym średnie wypełnienie gniazd. W gniazdach charakteryzujących się wskaźnikiem $a > 1$ proces wypełniania rozpoczyna się wcześniej, a stopień ich wypełnienia jest większy od wartości średniej, natomiast gniazda o wartości $a < 1$ są wypełnione w mniejszym stopniu. Znajomość wartości wskaźnika a ułatwia też oczywiście określenie zróżnicowania masy wyprasek poszczególnych gniazd.

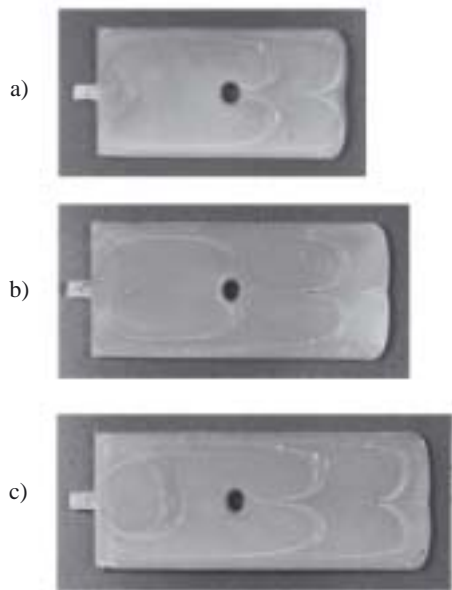
METODA MAGNESOWANIA TWORZYWA

W metodzie tej wykorzystuje się zjawisko magnesowania tworzywa napełnionego proszkiem ulegającym magnesowaniu podczas jego przepływu przez przewężkę. Schemat zastosowanej w badaniach S. Owady i H. Yokoi [26] części ruchomej formy wtryskowej ilustruje rys. 5. Generowanie pola magnetycznego rozpoczyna się wówczas, gdy strumień ciekłego tworzywa przepływającego w kanale doprowadzającym, dopływa do przewężki. Impulsy magnesujące charakteryzowały się tu



Rys. 5. Schemat części ruchomej formy wtryskowej do badań przepływu tworzywa w gnieździe formującym metodą magnesowania tworzywa napełnionego żelazianem strontowym: 1 — stalowa płyta podstawowa, 2 — gniazdo formujące, 3 — trzpień kształtujący otwór w wyprasce, 4 — przewężka, 5 — układ magnesowania tworzywa, 6 — wypychacz (czujnik ciśnienia), 7 — kanał doprowadzający, 8 — centralny kanał wlewowy [26]

Fig. 5. Scheme of movable part of mold for examination of strontium ferrite filled polymer flow in mold cavity, by magnetization method: 1 — steel mold base, 2 — cavity, 3 — obstacle pin, 4 — gate, 5 — magnetization unit, 6 — ejector (pressure sensor), 7 — runner, 8 — sprue [26]



Rys. 6. Wizualizacja przepływu polistyrenu zawierającego cząstki żelazianu strontowego magnesowane podczas przepływu przez przewężkę; a), b), c) — wypraski uzyskane metodą krótkich wtrysków z różnym czasem wtrysku [26]

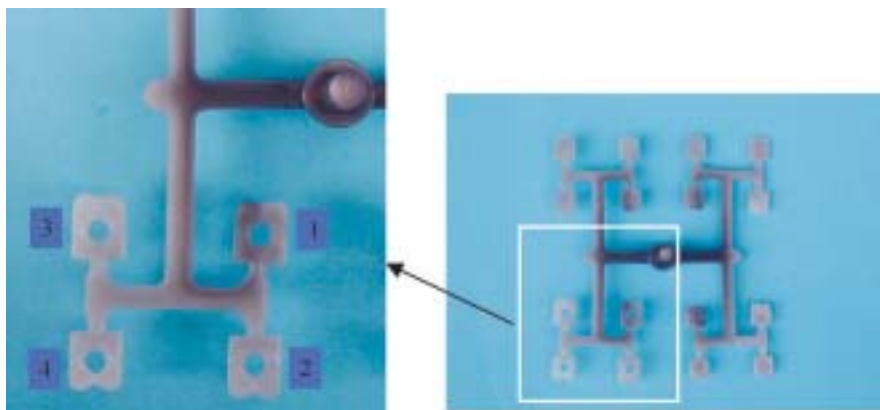
Fig. 6. Visualization of the flow of polystyrene containing particles of strontium ferrite, magnetized during the flow through the gate; a), b), c) — moldings obtained by short shot at different injection times [26]

czasem trwania wynoszącym 20 ms oraz okresem przerw 500 ms. W badaniach stosowano polistyren

z 20-proc. (masowo) zawartością żelazianu strontowego w postaci cząstek średnicy wynoszącej średnio 0,82 μm . Układ linii przepływu namagnesowanego proszku w wypraskach obserwowano z zastosowaniem magnetycznej cieczy detekcyjnej, nanoszonej na wypolerowaną powierzchnię próbki uzyskanej przez przecięcie wypraski w środku jej grubości.

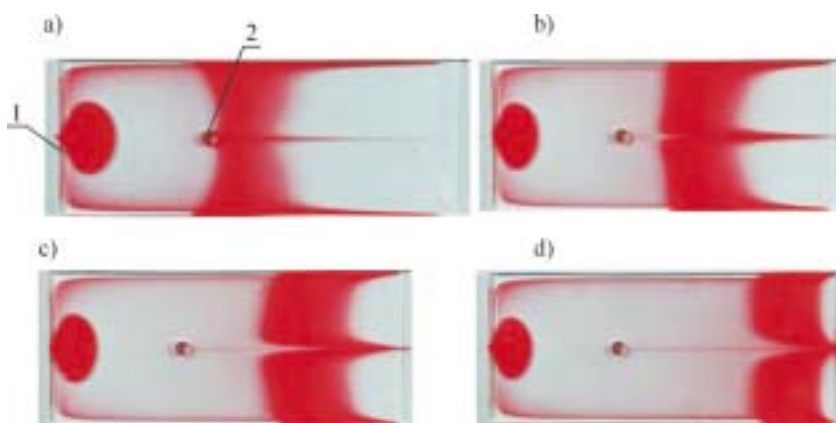
Na rysunku 6 pokazano wypraski polistyrenowe, uzyskane metodą krótkich wtrysków w warunkach różnych wartości czasów wtrysku, z widocznym układem linii płynięcia tworzywa. Można zaobserwować kolejne etapy wypełniania gniazda formującego oraz powstawania obszaru łączenia strumieni tworzywa za otworem. Na pierwszym etapie występuje prostopadle zderzanie się strumieni materiału (rys. 6a), a następnie widoczne są linie równoległego przepływu strumieni względem siebie (rys. 6b). Za otworem powstaje obszar zastojów tworzywa, który stopniowo zmniejsza się i jest rozciągany w kierunku przepływu tworzywa (rys. 6c). W obszarze intensywnego rozciągania tworzywo pochodzące z frontów jego strumieni ma niższą temperaturę, zatem i większą lepkość niż materiał znajdujący się wewnątrz strumieni. Wywiera to wpływ na powstawanie zróżnicowanej struktury i pogarsza właściwości wytrzymałościowe wyprasek z obszarami łączenia strumieni tworzywa.

Stanowisko badawcze zastosowane w tej metodzie nie jest zbyt złożone, wadą jej jest jednak to, że proszek ulegający magnesowaniu i dodawany w stosunkowo dużej ilości zmienia warunki przepływu tworzywa w formie.



Rys. 7. Wizualizacja przepływu zawierającego barwnik polietylenu dużej gęstości (DOW 10062E) w wielogniazdowej formie wtryskowej [21]

Fig. 7. Visualization of the flow of colored PE-HD (DOW 10062E) in multi-cavity mold [21]



Rys. 8. Wypraski z polistyrenu w dwóch kolorach uzyskane w warunkach naprzemiennego ich wtryskiwania: 1 — miejsce doprowadzania tworzywa do gniazda, 2 — otwór [26]

Fig. 8. Polystyrene moldings, in two colors, obtained by alternate injection mode: 1 — gate, 2 — hole [26]

ZASTOSOWANIE BARWNIKA JAKO ZNACZNIKA LINII PRZEPEŁYWU TWORZYWA

Zastosowanie barwnika do analizy linii przepływu tworzywa w formie wtryskowej jest możliwe zarówno w metodzie konwencjonalnego wtryskiwania [21, 26], jak i w procesach specjalnych, na przykład w wytwarzaniu wyprasek typu sandwich [27] bądź wtryskiwaniu dwuskładnikowym [28]. Wyniki badań przepływu tworzywa z barwnikiem w wielogniazdowej formie wtryskowej przedstawiliśmy w pracy [21]. Wprowadzenie do układu uplastyczniającego wtryskarki niewielkiej ilości barwnika pozwoliło na ocenę przepływu tworzywa w kanałach doprowadzających, przewężkach oraz w gniazdach. Wtryskiwanym tworzywem był biały polietylen dużej gęstości, natomiast barwnik miał kolor czarny. Przykładowe wyniki zamieszczono na rys. 7. Można zauważyć drogę przepływu zabarwionego tworzywa z centralnego kanału wlewowego do gniazda nr 1 — w przypadku zmiany kierunku przepływu cały czas

czasu wtryskiwania poszczególnych porcji tworzywa w obydwu kolorach. Na pierwszych dwóch (8a i 8b) jest widoczny przepływ fontanny bezpośrednio za trzpieniem kształtującym otwór oraz wydłużanie strumienia tworzywa w kolorze czerwonym wzdłuż powstającego obszaru łączenia strumieni tworzywa oraz w pobliżu ścianek gniazda formującego. Rysunki 8c oraz 8d odpowiadają innym czasom przemiennego wtryskiwania tworzywa białego i czerwonego.

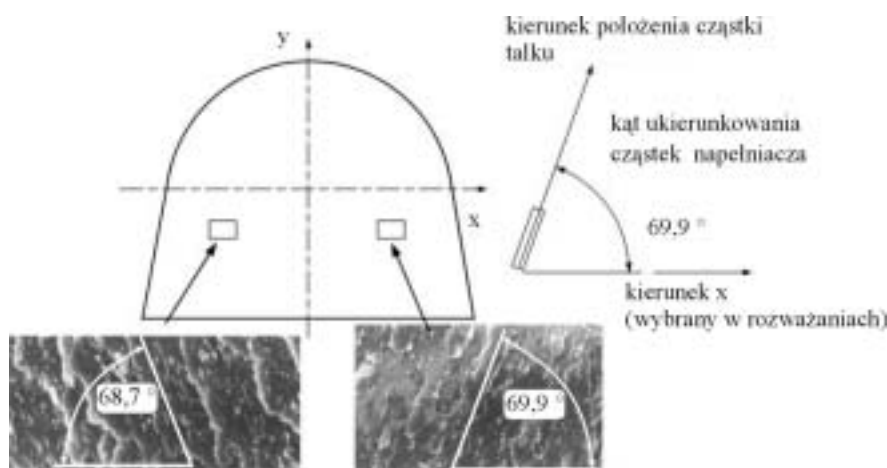
W opisanych badaniach przepływu tworzywa z wykorzystaniem barwnika można zaobserwować linie płynięcia zarówno na powierzchni wypraski, jak i w jej warstwach wewnętrznych.

ZASTOSOWANIE NAPEŁNIACZA PŁYTKOWEGO JAKO ZNACZNIKA LINII PRZEPEŁYWU TWORZYWA

Metoda ta, w której do wizualizacji linii przepływu wykorzystano orientację napełniacza płytkowego, została zaproponowana przez T. Sterzyńskiego i A. Bana-

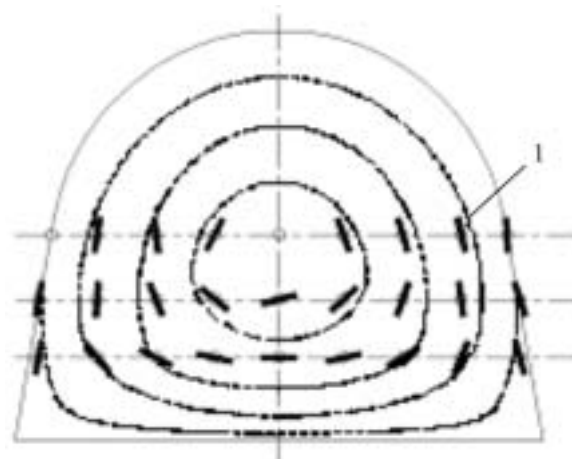
Rys. 9. Określanie kąta ukierunkowania cząstek napełniacza płytkowego w tworzywie zestalonym w kanale doprowadzającym formy wtryskowej [24]

Fig. 9. Determination of orientation angle of lamellar filler in a polymer solidified in a runner [24]



w tę samą stronę — po linii zbliżonej do spirali. Gniazdo to, jak już wspomnieliśmy, jest wypełniane jako pierwsze. Wypraska została wytworzona w cyklu wtryskiwania, w którym rozpoczynało się wprowadzanie zabarwionego tworzywa do formy. Odwrotny obraz, czyli wypraskę z widocznym zabarwionym strumieniem tworzywa przepływającym do gniazda numer 4, wypełnianego jako ostatnie, obserwuje się wówczas, gdy z układu uplastyczniającego wtryskarki jest wtryskiwana ostatnia porcja tworzywa z barwnikiem.

W cytowanej uprzednio pracy [26] zastosowano przemienne wtryskiwanie polistyrenu w kolorze białym oraz czerwonym do gniazda formującego, w którym uzyskiwano wypraski z obszarami łączenia strumieni tworzywa. Materiał doprowadzony z dwóch układów uplastyczniających, wtryskiwano do formy poprzez obrotowy układ sterowania przepływem tworzywa. W jednym cyklu wtryskiwania kolor tworzywa wtryskiwanego zmieniano pięciokrotnie. Na rys. 8 a—d przedstawiono wypraski uzyskane w warunkach różnego



Rys. 10. Rozkład kąta ukierunkowania cząstek talku w przekroju poprzecznym elementu zestalonego w kanale doprowadzającym: 1 — linie określające to ukierunkowanie

Fig. 10. Orientation angle distribution of talc particles in a cross-section of element solidified in a runner: 1 — lines illustrating the orientation

siak [29—32]. W badaniach stosowano polietylen małej gęstości („Malen E”) napelnięty talkiem w postaci cząstek o wymiarach mieszczących się w przedziale 3—9 μm („Naintsch A20”) bądź 2—7 μm („Naintsch A10”). Przygotowanie pobieranych z wyprasek wtryskowych próbek do badań polegało na wykonaniu w ciekłym azocie przełomów, które następnie napyłano złotem w celu uzyskania warstwy przewodzącej. Obserwacje prowadzone za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego umożliwiły rejestrację ukierunkowania cząstek napelnianca płytkowego, uwarunkowanego przepływem tworzywa w gnieździe formującym.

Określenie kąta położenia płytki talku względem kierunku przepływu tworzywa umożliwia ilościową ocenę zorientowania linii przepływu. Sposób wyznaczania wartości kąta ukierunkowania cząstek napelnianca przedstawiono na rys. 9, a rys. 10 pokazuje rozkład tego kąta w wybranych punktach pomiarowych w przekroju poprzecznym w elemencie zestalonym w kanale doprowadzającym formy wtryskowej. W środkowej części kanału cząstki napelnianca są ułożone niemal prostopadle do kierunku przepływu tworzywa w kanałach formy, co jest spowodowane przepływem poprzecznym (tzw. „efekt fontannowy”), natomiast w pobliżu ścianek formy cząstki takie usytuowane są prawie równoległe do tych ścianek.

Ta metoda badania przepływu tworzywa w formie umożliwia ocenę orientacji makrocząsteczek w wypraskach wtryskowych i jej wpływu na morfologię wyprasek, zatem i na ich właściwości użytkowe. Jest to sposób stosunkowo łatwy w realizacji, niewymagający dodatkowego oprzyrządowania do wytwarzania wyprasek. Pracochłonne jest natomiast przygotowanie próbek do obserwacji mikroskopowych oraz pomiar kąta ukierunkowania cząstek napelnianca.

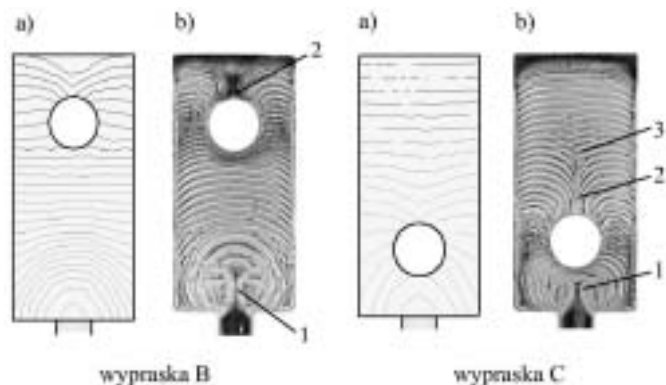
WTRYSKIWANIE Z POMINIĘCIEM FAZY DOCISKU

Zgodnie z tą metodą, tworzywo wtryskuje się do formy w specjalnych warunkach, w jakich uzyskuje się wypraski z widocznymi na ich powierzchni liniami przepływu materiału. Jak wynika z nazwy, podczas wtryskiwania pomija się tu fazę docisku. Spośród warunków wtryskiwania, największe znaczenie ma temperatura formy wtryskowej, która powinna być niższa od zalecanej w odniesieniu do danego tworzywa [33].

Badania prowadziliśmy z zastosowaniem doświadczalnej formy 16-gniazdowej (por. rys. 2). Stosowano przy tym poliacetal (POM) typu „Sniatal M8” firmy Rhodia, charakteryzujący się wskaźnikiem szybkości płynięcia $MFR = 48 \text{ g}/10 \text{ min}$ (2,16 kg, temp. 230 °C).

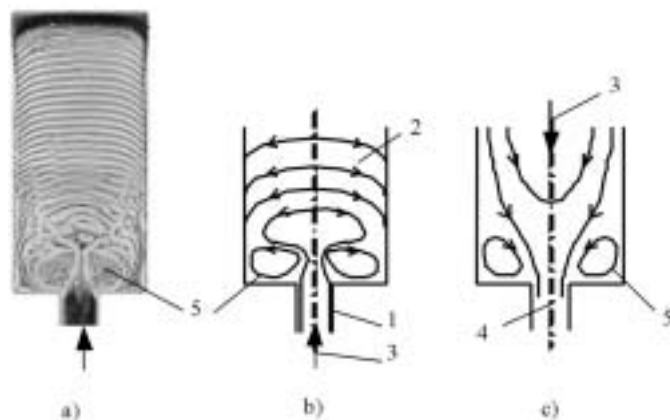
Warunki wtryskiwania były następujące: temperatura wtryskiwanego tworzywa i formy wtryskowej odpowiednio 180 °C i 30 °C, prędkość wtryskiwania 10 lub 120 mm/s. Wtryskiwanie prowadzono z zastosowaniem wtryskarki „Krauss Maffei KM 65/160/C1”.

Widoczne linie płynięcia tworzywa powstawały na jednej stronie wypraski kształtowanej przez płaską płytę formującą. Obserwacje linii płynięcia prowadzono za pomocą mikroskopu optycznego, w świetle odbitym. Wyniki obserwacji porównano z rezultatami symulacji komputerowej fazy wypełniania gniazda formującego wykonanych z wykorzystaniem programu „Moldflow ver. 4.1”.



Rys. 11. Porównanie wyników symulacji (a) oraz badań doświadczalnych (b) linii płynięcia tworzywa w wypraskach z POM: 1 — przepływ strumieniowy, 2 — obszar prostopadłego łączenia strumieni tworzywa, 3 — obszar równoległego łączenia strumieni tworzywa

Fig. 11. Comparison of the results of simulations (a) and experiments (b) of polymer flow lines in POM moldings: 1 — stream flow, 2 — area of perpendicular joining of polymer streams, 3 — area of parallel joining of polymer streams



Rys. 12. Wypraska (czas wtrysku 0,15 s) z widocznymi przepływami wtórnymi (a) oraz modele przepływu tworzywa w gnieździe formującym z kanału: b) węższego (przewężki) do szerszego, c) szerszego do węższego [35]; 1 — przewężka, 2 — gniazdo formujące, 3 — kierunek przepływu tworzywa, 4 — kanał wąski, 5 — linie przepływu wtórnego

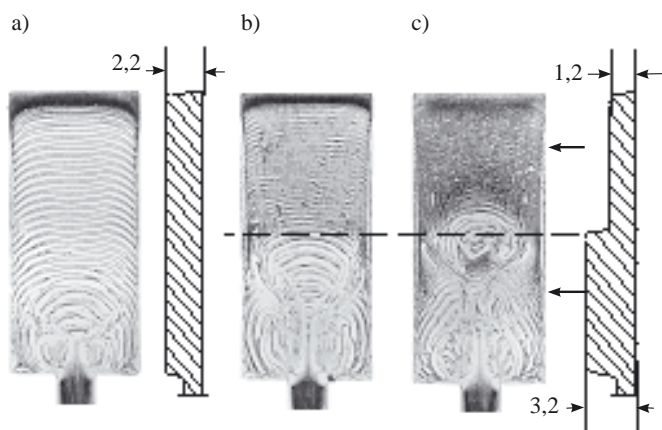
Fig. 12. Molding (injection time 0.15 s) with visible secondary flow (a) and the models of polymer flow in a cavity during its inflow from the channel: b) narrower (gate) to wider one, c) wider to narrower one [35]; 1 — gate, 2 — cavity, 3 — flow direction, 4 — narrow channel, 5 — secondary flow lines

Na rysunku 11 porównano wyniki uzyskane w symulacjach komputerowych oraz w badaniach doświadczalnych w odniesieniu do wyprasek z sekcji B oraz C. Widoczne są różnice w przebiegu linii płynięcia tworzywa bezpośrednio za przewężką oraz w obszarach łączenia strumieni tworzywa. Symulacje komputerowe nie umożliwiają pokazania skutków strumieniowego wypełniania gniazda, widocznego na wyprasce uzyskanej w procesie wtryskiwania. Nie jest również widoczny obszar równoległego łączenia strumieni tworzywa.

Badania doświadczalne pozwoliły na zaobserwowanie nieuwzględnianego w symulacjach komputerowych wtórnego przepływu tworzywa w narożach gniazda formującego (rys. 12a). Jest ono podobne do przedstawianego w literaturze [34, 35], a występującego podczas przepływu tworzywa z kanału szerszego do węższego (rys. 12c). Model przepływu materiału przez przewężkę do gniazda formującego, z zaznaczonymi obszarami przepływów wtórnych, przedstawiono na rys. 12b.

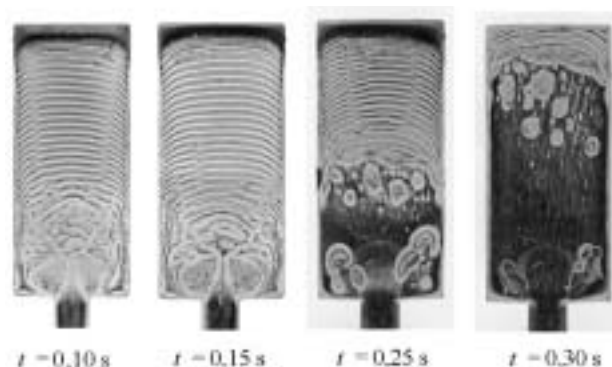
Wpływ zmiany grubości wypraski na przebieg linii płynięcia pokazano na rys. 13. W grubszej części wypraski (D) o zróżnicowanej grubości (3,2 mm oraz 1,2 mm) można zauważyć dłuższy przepływ strumieniowy (rys. 13b, c) niż w wyprasce (A) o jednakowej grubości wynoszącej 2,2 mm (rys. 13a). W cieńszej części wypraski (D) odległości pomiędzy liniami płynięcia są mniejsze niż w wyprasce (A). Widoczny jest także wpływ prędkości wtryskiwania na przebieg linii płynięcia w wyprasce D — większa prędkość powoduje powiększenie strumieniowego obszaru przepływu tworzywa.

Zależność przebiegu linii płynięcia od czasu wtrysku ilustruje rys. 14. Z przedłużaniem tego czasu zwiększa



Rys. 13. Wypraski z widocznymi liniami płynięcia uzyskane w różnych warunkach wtryskiwania; prędkość wtryskiwania i czas odpowiednio: a) 10 mm/s i 0,8 s (wypraska A), b) 10 mm/s i 0,7 s (wypraska D), c) 120 mm/s i 0,11 s (wypraska D) [33]

Fig. 13. Moldings with visible flow lines obtained at various injection molding conditions; injection velocity and injection time, respectively: a) 10 mm/s and 0,8 s (molding A), b) 10 mm/s and 0,7 s (molding D), c) 120 mm/s and 0,11 s (molding D) [33]



Rys. 14. Wypraski z widocznymi liniami płynięcia uzyskane w warunkach różnego czasu wtrysku (t) [33]

Fig. 14. Moldings with visible flow lines obtained at different injection time (t) [33]

się ciśnienie tworzywa w gnieździe formującym, czego skutkiem jest zanikanie linii płynięcia na powierzchni wypraski rozpoczynające się od obszarów położonych blisko przewężki, gdzie panuje wyższe ciśnienie tworzywa niż w końcowej części gniazda.

Przedstawiona metoda badania przepływu tworzywa w formie wtryskowej jest prosta — w jej realizacji nie potrzeba stosować specjalnego oprzyrządowania, a jedyny wymóg to właściwy wybór warunków wtryskiwania. Ułatwia ona analizę zachowania się ciekłego materiału w kanałach formy oraz ocenę jego wpływu na jakość wyprasek wtryskowych. Pewnym ograniczeniem tej metody jest to, że obserwacja linii przepływu jest możliwa tylko na powierzchni wypraski.

PODSUMOWANIE

Rosnące wymagania związane z jakością i wydajnością procesu wtryskiwania powodują konieczność monitorowania i sterowania przebiegiem wszystkich faz tego procesu. W związku z tym jest celowe prowadzenie zarówno symulacyjnych, jak i doświadczalnych badań zjawisk zachodzących podczas przepływu tworzywa w formie, powinny one bowiem ułatwić ocenę efektywności procesu wtryskiwania dokonywaną na podstawie pomiaru fizycznych oraz użytkowych właściwości wyprasek wtryskowych a także obserwacji cech ich powierzchni.

W symulacjach numerycznych konieczne jest jednak wprowadzenie założeń upraszczających rozwiązywanie problemu. Nie uwzględnia się w nich niektórych zjawisk występujących w rzeczywistych procesach wtryskiwania, na przykład ściśliwości tworzywa bądź powstawania asymetrii frontu strumienia tworzywa w wyniku zmiany kierunku przepływu ciekłego tworzywa w kanałach formy wtryskowej; zjawiska te wywierają wpływ na przebieg procesu wypełniania gniazda formującego, a w konsekwencji — na właściwości wyprasek. Duże znaczenie, często w połączeniu z symulacjami komputerowymi, mają więc badania doświadczalne.

Przystawione metody badawcze umożliwiają obserwację i analizę takich właśnie zjawisk, a niekiedy również ich ocenę ilościową. Wybór metody zależy od celu badań oraz możliwości dysponowania określoną aparaturą.

LITERATURA

1. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1989, str. 177-222.
2. Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, WE, Warszawa 1993, str. 177—228.
3. Osswald T. A., Turng L-S., Gramann P. J.: „Injection Molding Handbook”, Hanser Publishers, Munich, Hanser Gardner Publications, Inc., Cincinnati, 2001, str. 63—124.
4. Beaumont J. P., Nagel R., Sherman R.: „Successful Injection Molding”. Hanser Publishers, Munich 2002, str. 30—72.
5. Bociąga E.: „Procesy determinujące przepływ tworzywa w formie wtryskowej i jego efektywność”. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, str. 9—52.
6. Sikora R., Bociąga E.: *Polimery* 2003, **48**, 100.
7. Yokoi H.: PPS-16, The Polymer Processing Society Sixteenth Annual Meeting, Shanghai, 2000, str. 136.
8. Dias G. R., Cunha A. M., Brito A. M., Vincent M.: por. [7], str. 199.
9. Yokoi H., Kushida S., Matuzaka S.: Europa-Africa Region Meeting of the Polymer Processing Society, Gothenburg 1997, p. 3:17.
10. Yokoi H., Han X.: PPS-21, The Polymer Processing Society Twenty First Annual Meeting, Leipzig 2005, str. 2—6.
11. Lorin N., Ropars K., Vincent M.: PPS-18, The Polymer Processing Society Eighteenth Annual Meeting, Guimaraes 2002, str. 124.
12. Su G. Y., Yokoi H., Yang W. M.: Europa-Africa Meeting of the Polymer Processing Society — PPS 2003. Athens 2003, str. 87.
13. Yang S. Y., Nian S. C., Sun I. C.: por. [11], str. 059.
14. Yang S. Y., Nian S. C., Sun I. C.: *Int. Polym. Process.* 2002, **17**, nr 4, 354.
15. Nian S. C., Yang S. Y.: The Polymer Processing Society Twentieth Annual Meeting and Anniversary Celebration, Akron 2004, str. 209.
16. Hasegawa S., Yokoi H., Murata Y.: por. [12], str. 90.
17. Hasegawa S., Yokoi H.: por. [10], str. 2-2.
18. Yeo M. W. I., Daver F.: por. [11], str. 500.
19. Yokoi H., Tadematsu S.: por. [11], str. 407.
20. Bociąga E., Jaruga T., Koszkuł J.: „Achievements in Mechanical & Materials Engineering”, 12th International Scientific Conference, Gliwice — Zakopane 2003, str. 107.
21. Bociąga E., Jaruga T.: por. [15], str. 217.
22. Bociąga E., Jaruga T.: w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo”. Wyd. Politechniki Częstochowskiej (red. Koszkuł J., Bociąga E.), Częstochowa 2004, str. 220.
23. Bociąga E., Jaruga T.: Advances in Plastics Technology — APT'05, Katowice 2005, str. 48.
24. Bociąga E., Jaruga T., Sterzyński T., Banasiak A.: por. [10], str. 2—16.
25. Washizaki T., Sugiyama K., Tubagus N. H.: por. [10], str. 2—17.
26. Owada S., Yokoi H.: por. [12], str. 89.
27. Watanabe D., Hamada H., Tomari K.: por. [11], str. 105.
28. Ilinca F., Dourdour A., Hetu J. F.: por. [11], str. 432.
29. Banasiak A., Błędzki A., Sterzyński T.: por. [12], str. 169.
30. Banasiak A., Sterzyński T.: VIII Profesorskie Warsztaty Naukowe „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2003, str. 21.
31. Banasiak A., Sterzyński T.: *Polimery* 2004, **49**, 442.
32. Banasiak A., Sterzyński T.: w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo” (red. J. Koszkuł, E. Bociąga), Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, str. 36.
33. Bociąga E., Jaruga T.: *J. Achiev. Mat. Manufact. Eng.* 2006, **18**, 331.
34. Bociąga E., Jaruga J.: *Polimery* 2006, **51**, nr 11—12.
35. Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”. Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 145—250.