

ELŻBIETA BOCIĄGA, TOMASZ JARUGA

Politechnika Częstochowska
Instytut Przetwórstwa Polimerów i Zarządzania Produkcją
Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa
e-mail: jaruga@kpts.pczest.pl

Badania mikroskopowe przepływu tworzywa w kanałach 16-gniazdowej formy wtryskowej

Streszczenie — Przedstawiono wyniki badania niezrównoważonego przepływu tworzywa w 16-gniazdowej formie wtryskowej ze zrównoważonym, równoległym układem zimnych kanałów doprowadzających, stanowiącej przykład form używanych do produkcji małych wyprasek. W ich przypadku niekorzystny wpływ niezrównoważonego przepływu tworzywa w kanałach na przepływ w gniazdach i na właściwości wyprasek jest duży. Badania mikroskopowe wykazały, że zmiana kierunku przepływu w kanałach doprowadzających powoduje asymetrię przepływu w przekroju kanału. W omawianym rozwiązaniu konstrukcyjnym układu doprowadzania tworzywa jest to przyczyną nierównoczesnego wypełniania gniazd. Nierównomierny rozkład temperatury formy w płaszczyźnie podziału pojawiający się po kilku cyklach wtryskiwania (badania termowizyjne) stanowi kolejny czynnik wpływający na opisany problem. Scharakteryzowano również różnice w strukturze wyprasek pochodzących z poszczególnych gniazd i zinterpretowano przyczyny tego zjawiska.

Słowa kluczowe: wielogniazdowa forma wtryskowa, zrównoważone kanały doprowadzające, asymetria przepływu, rozkład temperatury, morfologia wyprasek.

MICROSCOPIC INVESTIGATIONS OF POLYMER FLOW IN THE RUNNERS OF 16-CAVITY INJECTION MOLD

Summary — The results of investigations of polymer imbalanced flow in 16-cavity injection mold with balanced set of cold runners (Fig. 1 and 2) were presented. Such mold is an example of the molds designed for small size parts' manufacturing. In this case disadvantageous effect of polymer imbalanced flow in the runners on moldings properties is significant (Fig. 3). Microscopic investigations showed that the change in flow direction in the runners caused the flow asymmetry in runner cross-section (Fig. 5 and 6). This is the reason of inequality in cavities' filling (Fig. 7 and 8) in the construction of the system discussed. Uneven temperature distribution in the mold across the parting plane, occurring after a few injection cycles (thermvision investigations), additionally influences the imbalance effect (Fig. 4). The differences in the structures of the moldings coming from particular cavities were characterized (Fig. 9 and 10) and the reasons of the phenomenon were interpreted.

Key words: multicavity injection mold, balanced runners, flow asymmetry, temperature distribution, morphology of moldings.

PRZEPIY W TWORZYWA W FORMIE A WŁAŚCIWOŚCI WYPRASKI

W wielu przypadkach wielogniazdowe formy wtryskowe stanowią w technice dogodne rozwiązanie, gdyż dają możliwość zwiększenia wydajności produkcji. Bardzo ważną kwestią jest przy tym równomierny przepływ tworzywa w tego rodzaju formach. Konstrukcja układów doprowadzenia tworzywa powinna zapewniać wypełnianie wszystkich gniazd w takich samych warunkach i tym samym czasie, co jest istotne ze względu na małą tolerancję masy i właściwości wyprasek.

W publikacjach dotyczących budowy form wtryskowych zawsze zwraca się uwagę na prawidłową konstrukcję kanałów doprowadzających i przewężek [1—8].

Istnieją liczne wymagania odnoszące się do tych pierwszych. Tak więc długość kanałów powinna być możliwie najmniejsza, aby zminimalizować straty materiału a także uniknąć nadmiernego spadku ciśnienia podczas przepływu przez nie tworzywa. W formach wielogniazdowych kanały powinny być zrównoważone. Jeden z rodzajów zrównoważenia to zrównoważenie naturalne (geometryczne, *geometrical balance*) [1, 9]. W tym rozwiązaniu droga, którą pokonuje tworzywo przepływające w kanałach — począwszy od kanału centralnego (zwanego czasem kanałem wlewowym) do każdego gniazda — jest taka sama.

Można rozróżnić wiele typów układów geometrycznie zrównoważonych kanałów doprowadzających. Zgodnie z jednym z nich kanały mają kształt zwielokrot-

nionej litery „H”. Zaletą takiego rozwiązania jest większa przestrzeń do umieszczenia gniazd w płycie matrycowej w porównaniu, na przykład, z układem gwiazdowym. Wada natomiast polega tu na stosunkowo znacznej stracie materiału spowodowanej dużą sumaryczną długością kanałów doprowadzających. Większy jest również spadek ciśnienia tworzywa przepływającego w kanałach, zanim osiągnie ono gniazdo formujące [4]. Często jednak łatwiejszy do wykonania jest właśnie taki układ kanałów. Odnosi się to do wyprasek o kształcie zbliżonym do prostokątnego, gdy płyty formujące również mają kształt prostokątny.

Jednoczesne wypełnienie gniazd można również osiągnąć dzięki zastosowaniu zmiennych przekrojów kanałów i przewęzek — większych w przypadku kanałów doprowadzających tworzywo do gniazd położonych dalej od kanału centralnego. Tak rozwiązane konstrukcyjnie kanały doprowadzające nazywane są sztucznie zrównoważonymi („*artificially balanced runners*”) [1, 9].

Badania przeprowadzone w ostatnich latach zakwestionowały jednak wariant naturalnie zrównoważonych kanałów jako zapewniających równomierne wypełnienie gniazd formujących [1, 9—16]. Zgodnie z teorią przedstawioną przez J. Beaumonta [1, 9, 12], najczęstszą przyczyną nierównoważonego przepływu, prowadzącego do nierównomiernego wypełnienia gniazd formujących i zróżnicowanych właściwości wyprasek wytworzonych w poszczególnych gniazdach są zjawiska termokinetyczne występujące podczas przepływu ciekłego tworzywa w kanałach.

Różnice w wypełnianiu gniazd mogą być spowodowane niejednakowymi warunkami przepływu tworzywa do każdego gniazda (temperatura formy, prędkość przepływu). Kolejność ich wypełniania wpływa na dalsze zróżnicowanie warunków kształtowania wypraski w fazie docisku. Wypraski formowane w gniazdach wypełnionych wcześniej są poddane większemu ciśnieniu i zostają wypełnione przez tworzywo o wyższej temperaturze. Zależność właściwości wyprasek od warunków wtryskiwania jest zresztą wciąż przedmiotem licznych publikacji.

Morfologia wyprasek, orientacja w nich napełniaczy, formowanie się naskórka oraz inne właściwości, takie jak dwójłomność optyczna, skurcz bądź właściwości mechaniczne, badano w szerokim przedziale zmienności warunków wtryskiwania [17—23]. Nadal jednak w niedostatecznym stopniu scharakteryzowano różnice właściwości wyprasek spowodowane nierównomiernością wypełniania gniazd w formach wielogniazdowych.

Właściwe zaprojektowanie układu chłodzenia formy stanowi dla konstruktorów form ważne zadanie. Kanały chłodzące (bardziej odpowiednią nazwą mogłyby być „kanały termostatujące”) powinny zapewnić bardzo dobrą wymianę ciepła pomiędzy czynnikiem chłodzącym, materiałem formy a wypraskami. Rozkład tempe-

ratury należy regulować w taki sposób, aby na powierzchni gniazda formującego temperatura była w miarę możliwości jednakowa. W wielu przypadkach na powierzchni tej występują jednak lokalne obszary o podwyższonej temperaturze. Przyczyną takiego stanu rzeczy może być skomplikowany kształt geometryczny gniazda bądź nieefektywny układ chłodzący. Nierównomierność temperatury powierzchni gniazda wpływa na proces krzepnięcia oraz na krystalizację tworzywa, co w rezultacie powoduje różne wartości stopnia krystaliczności w poszczególnych obszarach wypraski [24], zatem i zróżnicowanie jej właściwości mechanicznych.

W przypadku form wielogniazdowych istotne jest więc, aby w każdym gnieździe panowała taka sama temperatura formy. W celu uzyskania wyprasek wysokiej jakości można wykonać wstawkę z kanałami chłodzącymi, których cechą jest skomplikowany kształt, dopasowany do powierzchni gniazda formującego (tzw. konformalne kanały chłodzące) [25—27]. Możliwości ich uzyskania dają metody szybkiego wykonywania narzędzi (*Rapid Tooling Technologies*), na przykład SLM — *Selective Laser Melting*, czyli selektywne stapianie laserowe. Producenci form wtryskowych są niekiedy zmuszeni nawet do zmiany konstrukcji formy w przypadku problemów z nierównomiernym rozkładem temperatury.

Narzędzia służące do oceny rozkładu temperatury formy to m.in. symulacje komputerowe oraz pomiary temperatury podczas wtryskiwania. Do szybkiej i precyzyjnej oceny można użyć kamer termowizyjnych. Dzięki nim zaoszczędza się dużo czasu w porównaniu z rozwiązaniem polegającym na montażu szeregu czujników temperatury w formie. Obraz temperatury uzyskany za pomocą kamery termowizyjnej jest też bardziej kompletny niż otrzymany z zastosowaniem pirometru. Zalety termowizji są oczywiste — możemy obserwować całą płaszczyznę podziału, podczas gdy czujniki mierzą temperaturę tylko w określonym punkcie. Termowizja ma dziś wiele obszarów zastosowań, w tym medycynę, wojskowość, energetykę bądź budownictwo [28].

Struktura wyprasek wtryskowych w dużym stopniu zależy od warunków wtryskiwania. Szczególnie interesujące obserwacje mikroskopowe można przeprowadzić w świetle spolaryzowanym, badając próbki pobrane z wyprasek wtryskowych z tworzyw częściowo krystalicznych. W przekroju wypraski widocznych jest kilka warstw. Zwykle w wyprasce można rozróżnić trzy warstwy: naskórek, warstwę silnie zorientowaną podczas przepływu oraz niezorientowaną warstwę w środku przekroju wypraski. Warstwa zorientowana cechuje się znaczną dwójłomnością optyczną. Grubość poszczególnych warstw w odniesieniu do danego materiału może się zmieniać w zależności od warunków wtryskiwania [17—21].

Opisane w niniejszej publikacji badania własne zostały wykonane w celu wykazania, że gniazda w formie wtryskowej z geometrycznie zrównoważonymi kanała-

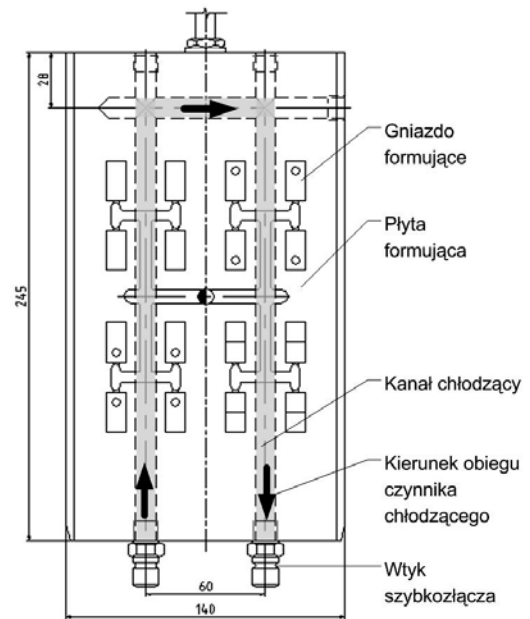
mi nie są wypełniane równocześnie oraz ustalenia, jak ta nierównomierność wypełniania wpływa na zróżnicowanie struktury wyprasek. Rozkład temperatury formy wtryskowej został zbadany za pomocą kamery termowizyjnej.

Do badań użyto eksperymentalnej wielogniazdowej formy wtryskowej będącej przykładem form do produkcji dużej liczby wyprasek spełniających ostre wymagania odnoszące się do powtarzalności właściwości. Wypraski wytwarzane w tej formie mają prosty kształt geometryczny oraz są wypraskami małymi; sprawia to, że wpływ przepływu tworzywa w kanałach formy na wypełnianie gniazd jest duży.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Forma wtryskowa

Badania prowadzono w zaprojektowanej i wykonanej we własnym zakresie wielogniazdowej formie wtryskowej. Ma ona 16 gniazd podzielonych na 4 sekcje oznaczone literami A—D. Każda sekcja składa się z czterech gniazd o jednakowym kształcie, ale poszczególne sekcje różnią się między sobą (rys. 1). Sekcja A składa się z gniazd prostokątnych (z wynoszącym 5° pochyleniem ścianek bocznych) grubości 2,25 mm. W sekcji B i C w gnieździe formującym występuje przeszkoda, w wyniku czego uzyskuje się wypraski z obszarami łączenia strumieni tworzywa. Gniazda z sekcji D mają stopniowaną grubość: 3,25 mm przy przewężce oraz 1,25 mm od połowy długości wypraski. Układ doprowadzenia tworzywa składa się z kanałów zrównoważonych geometrycznie. Jest to układ równoległy w systemie „podwójne H”. Każde z gniazd jest zasilane przez



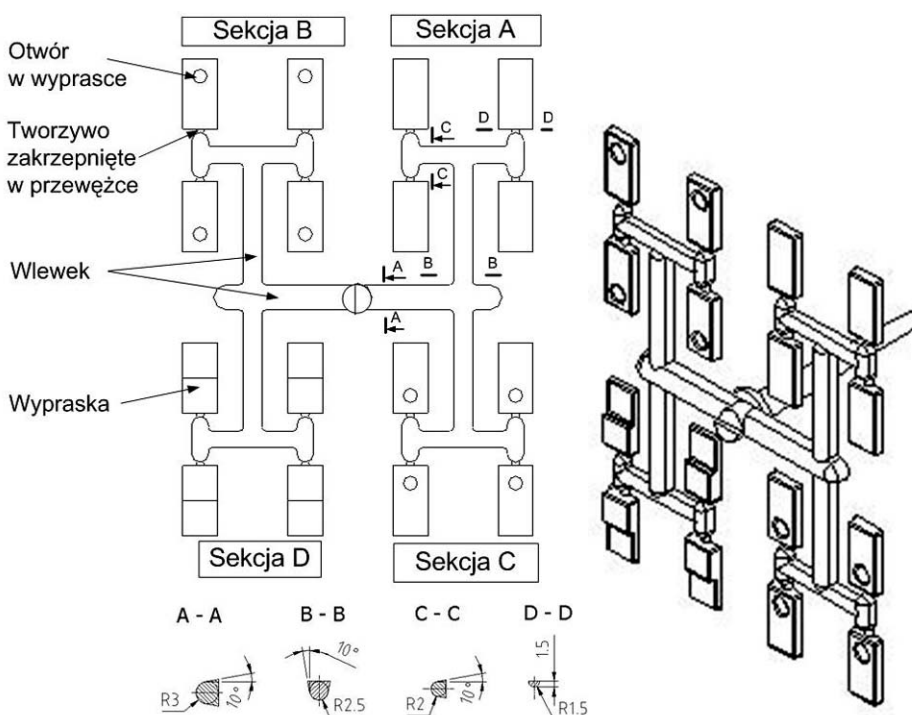
Rys. 2. Układ kanałów chłodzących w płycie matrycowej
Fig. 2. Cooling channels' layout in the cavity plate

przewężkę z półkolistym przekrojem o promieniu 1,5 mm.

Układ kanałów chłodzących jest nieskomplikowany (rys. 2) i zapewnia w przybliżeniu jednakowe warunki ochładzania wyprasek. Kanał przechodzi symetrycznie pod parami wyprasek przez każdą sekcję.

Badane tworzywa

Do badań wykorzystano następujące częściowo krystaliczne tworzywa polimerowe:



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia wyprasek wytwarzanych w formie używanej w badaniach wraz z wlewkiem

Fig. 1. Scheme of moldings' layout in the testing mold

— Polietylen dużej gęstości (PE-HD) „Hostalen GC 7260” produkcji firmy Basell Orlen Polyolefins, o $MFR = 8 \text{ g}/10 \text{ min}$ (temp. $190 \text{ }^\circ\text{C}$, $2,16 \text{ kg}$).

— Polietylen małej gęstości (PE-LD) „Malen E FABS,23-D022” produkcji PKN Orlen S.A. (obecnie Basell Orlen Polyolefins), o $MFR = 1,6\text{—}2,5 \text{ g}/10 \text{ min}$ (temp. $190 \text{ }^\circ\text{C}$, $2,16 \text{ kg}$) z talkiem „Naintsch A20” firmy Luzenac (10 % mas.).

— Polipropylen (PP) „Malen P F-401” produkcji firmy Basell Orlen Polyolefins, o $MFR = 2,4\text{—}3,2 \text{ g}/10 \text{ min}$ (temp. $230 \text{ }^\circ\text{C}$, $2,16 \text{ kg}$).

Proces wypełniania formy przez wszystkie rodzaje tworzyw scharakteryzowano metodą krótkich wtrysków. Badania termowizyjne zrealizowano podczas wtryskiwania PE-HD.

Warunki wtryskiwania

Część próbek wytwarzano metodą krótkich wtrysków, stosując zmienne wartości temperatury wtryskiwania, temperatury formy oraz prędkości wtryskiwania, bez fazy docisku. Warunki wtryskiwania zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Warunki wtryskiwania badanych tworzyw
T a b l e 1. Conditions of injection molding of the polymers tested

Warunki wtryskiwania	Tworzywo		
	PE-HD „Hostalen”	PP „Malen-P”	PE-LD + talk
Temperatura wtryskiwania (T_w), $^\circ\text{C}$	200—240—280	240	185
Temperatura formy (T_f), $^\circ\text{C}$	20—40—60	30—60	20
Prędkość wtryskiwania (v), mm/s	10—65—120	95	10—65—120

Wypraski z pełnych cykli wtryskiwania uzyskano natomiast stosując podane wyżej warunki oraz ciśnienie docisku p_d wynoszące odpowiednio: 35 MPa (PE-HD) lub 40 MPa (PP i PE-LD + talk).

Krótkie wtryski

W celu oceny przebiegu wypełniania gniazd wykonano serię tzw. „krótkich wtrysków”. Ta łatwa do zastosowania metoda pozwala na wizualne stwierdzenie, jak wypełniane są gniazda formy wtryskowej [7, 15, 16]. Również w badanym przypadku umożliwiło to ustalenie sekwencji wypełniania gniazd. Aby uzyskać taki efekt, pominięto fazę docisku oraz dobrano odpowiednio krótki czas wtryskiwania, tak aby gniazda nie zostały całkowicie wypełnione.

Proces wtryskiwania prowadzono za pomocą wtryskarki „Krauss-Maffei KM 65/160/C1” o sile zamykania

formy 650 kN z układem uplastyczniającym wyposażonym w ślimak średnicy 30 mm .

Badania termowizyjne

Jedną z oczekiwanych przyczyn niejednoczesnego wypełniania gniazd jest zróżnicowana temperatura formy w płaszczyźnie podziału; dotyczy to zwłaszcza temperatury ścianki gniazd formujących.

Zdjęcia termowizyjne formy w płaszczyźnie podziału oraz wyprasek wraz z tworzywem z kanałów wykonano po pięciu pełnych cyklach wtryskiwania PE-HD „Hostalen GC 7260” (temperatura formy $40 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura wtryskiwania $240 \text{ }^\circ\text{C}$). Posługiwano się przy tym kamerą termowizyjną typu „ThermaCam PM 590” firmy Flir. W celu uniknięcia refleksów światła zakłócających pomiar, powierzchnię formy pokryto cienką warstwą czarnej farby.

Badania mikroskopowe

Dokonano szeregu obserwacji mikroskopowych (mikroskop „Olympus BH-2”) w spolaryzowanym świetle przechodzącym, badając strukturę tworzywa w przekroju wyprasek oraz w przekroju kanałów doprowadzających. Próbkę otrzymano za pomocą mikrotomu „Anglia Scientific”. Grubość ścinów mikrotomowych wynosiła ok. $15 \text{ } \mu\text{m}$.

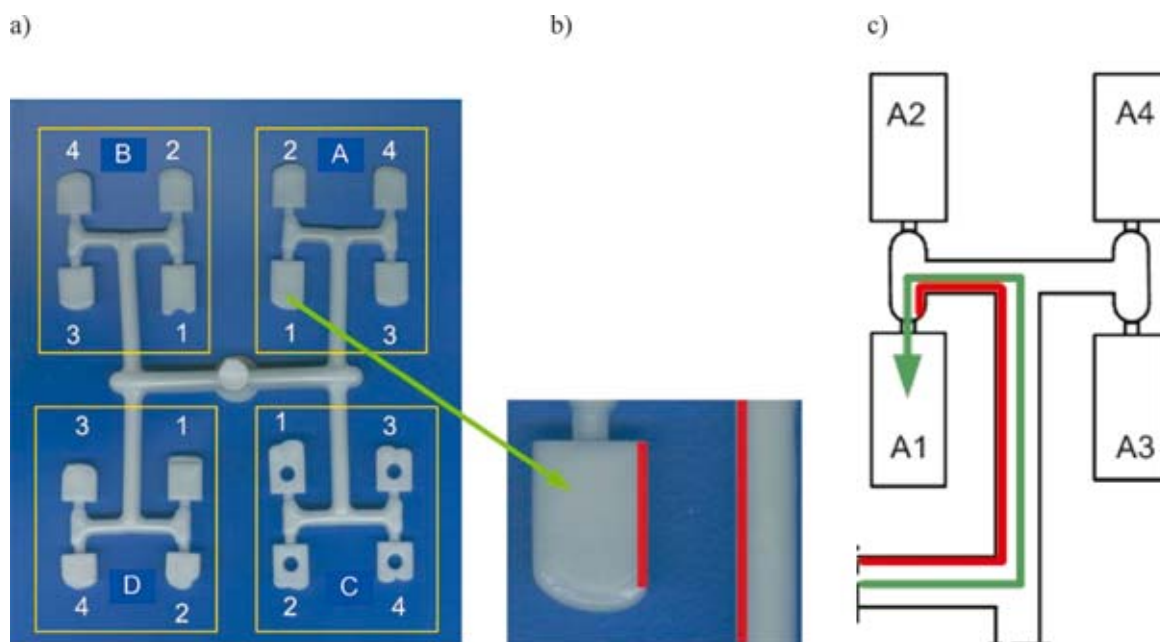
WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Próbki polietylenowe

Krótkie wtryski

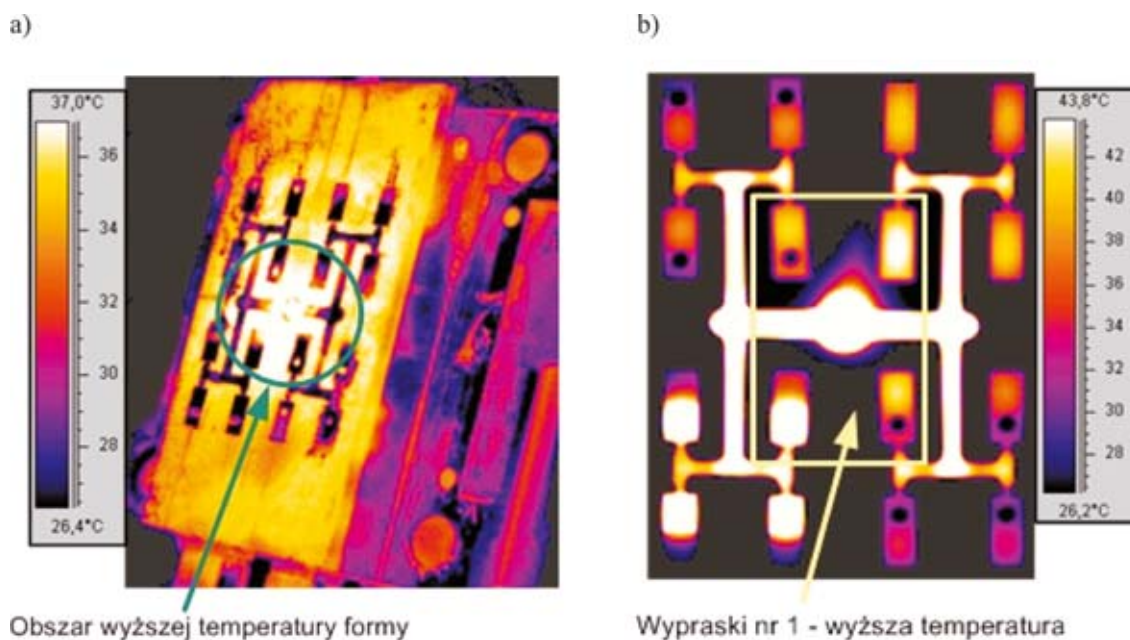
Wypraski otrzymane ze wszystkich badanych tworzyw w różnych warunkach wtryskiwania dają obraz nierównomiernego wypełnienia gniazd formy. W każdej sekcji stopień wypełnienia jest różny w odniesieniu do każdego gniazda. Wypraski w każdej sekcji oznaczono liczbami od 1 do 4, w zależności od kolejności wypełniania (rys. 3a). Front przepływu jest najbardziej zaawansowany w gniazdach oznaczonych numerem 1, które są położone na końcu spiralnego toru rozpoczynającego się od kanału centralnego (rys. 3c). Ponadto widoczna jest asymetria frontu przepływu tworzywa w gniazdach.

Przyczyną większej prędkości przepływu jest zmniejszona lepkość tworzywa w obszarze o wyższej temperaturze formy. W odniesieniu do gniazd 1 oraz 3 efekt asymetrii przepływu jest wzmacniany ze względu na wyższą temperaturę formy, wynikającą z umiejscowienia kanału doprowadzającego w pobliżu wypraski (rys. 3b). W przypadku każdego gniazda ostatni zakręt kanału determinuje asymetrię frontu przepływu tworzywa w gnieździe. Bardziej zaawansowany jest obszar frontu po wewnętrznej stronie kanału, oznaczonej na przykład na rys. 3c linią czerwoną (gniazdo A1). Prowa-



Rys. 3. Wypraski z PE-LD + talk uzyskane w warunkach krótkich wtrysków: a) wypraski ponumerowane zgodnie ze stopniem wypełnienia, b) krótki wtrysk do gniazda A1 — widoczna asymetria przepływu, c) spiralny tor przepływu tworzywa do najszybciej wypełnianego gniazda numer 1 (prędkość wtryskiwania 65 mm/s)

Fig. 3. PE-LD/talc molding prepared at short shots' conditions: a) moldings numbered according to the filling degree, b) short shot into A1 cavity — visible flow asymmetry, c) spiral path of polymer flow into the fastest filled cavity No. 1 (injection rate 65 mm/s)



Obszar wyższej temperatury formy

Wypraski nr 1 - wyższa temperatura

Rys. 4. Zdjęcia termowizyjne: a) powierzchnia formy wtryskowej po 5 pełnych cyklach wtryskiwania; b) wypraski wraz z tworzywem zestalonym w kanałach, bezpośrednio po wyjęciu z formy

Fig. 4. Thermovision images of: a) mold surface after 5 full injection cycles; b) moldings with the polymer solidified in the runners, just after ejection from the mold

dzi to do wniosku, że obok temperatury formy duże znaczenie ma tu także kinetyka przepływu.

Badania termowizyjne

Wyniki uzyskane metodą zdjęć termowizyjnych wskazują na wyższą temperaturę formy dookoła kanału

wlewowego (rys. 4a). Oznacza to, że gniazda numer 1 znajdują się w strefie o wyższej temperaturze. Efekt można zaobserwować na zdjęciach wyprasek wyjętych z formy wraz z tworzywem zestalonym w kanałach doprowadzających. Wypraski z gniazd numer 1 mają wyższą temperaturę (rys. 4b). Temperatura środkowej części

formy wzrasta w miarę prowadzenia kolejnych wtrysków; stwierdzono to na podstawie zdjęć termowizyjnych uzyskiwanych w kolejnych cyklach wtryskiwania, począwszy od pierwszego wtrysku do formy.

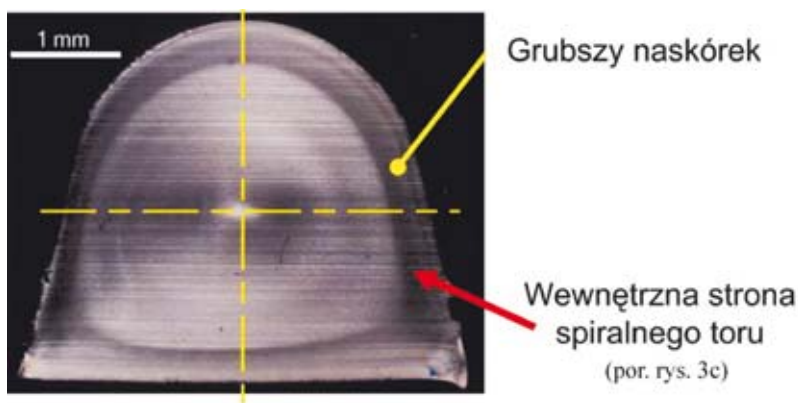
Ocena struktury tworzywa zestalonego w kanałach doprowadzających

Zjawiska występujące podczas przepływu tworzywa w kanałach są prawdopodobnie główną przyczyną niejednoczesnego wypełniania gniazd. Z wyników uzyskanych w badaniach krótkich wtrysków można wnioskować, iż szybszy przepływ tworzywa występuje w tym obszarze na przekroju kanału, który leży po wewnętrznej stronie spiralnego toru od kanału wlewowego do gniazda numer 1 (A1, B1, C1, D1). Aby sprawdzić te przewidywania, pobrano próbki do badań mikroskopowych z tworzywa zakrzepniętego w kanałach doprowadzających.

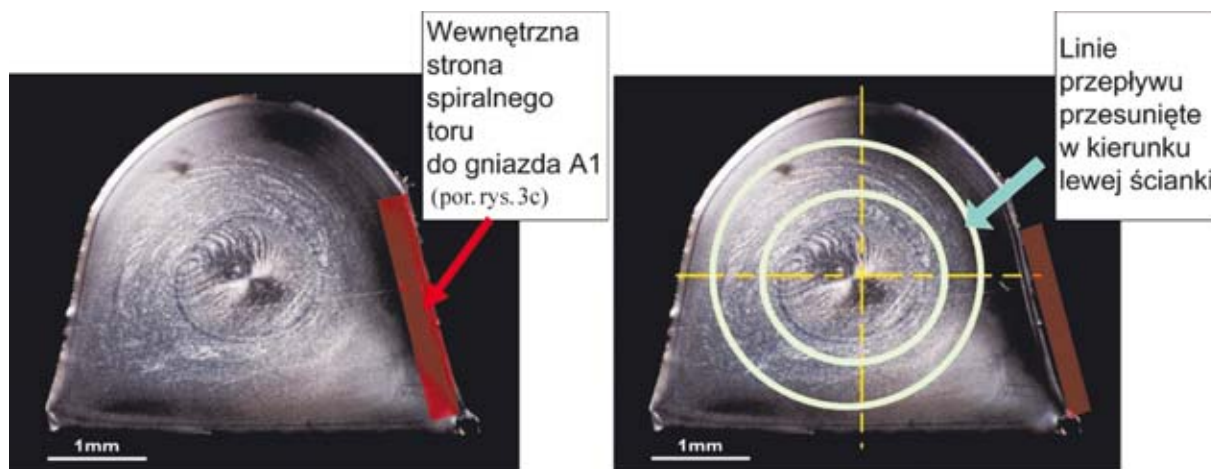
W próbkach PE-LD + talk jest widoczna różnica grubości naskórka po obu stronach kanału (rys. 5). Strona o grubszym naskórku (zaznaczona kolorem czerwonym na rys. 3) występuje od wewnętrznej strony spiralnego toru przepływu tworzywa do gniazda numer 1, które wypełnia się w pierwszej kolejności.

W przypadku próbek PE-HD obserwacje mikroskopowe w świetle spolaryzowanym ujawniły utworzony w strukturze tworzywa układ linii pokazany na rys. 6. Linie te są efektem przepływu materiału w kanale oraz zachodzącego w trakcie cyklu wtryskiwania procesu jego krystalizacji. Dodatek niewielkiej ilości barwnika powoduje dobrą widoczność tychże linii w strukturze krystalicznej (por. [29]). Obserwowany układ linii nie jest symetryczny, lecz wyraźnie przesunięty w kierunku ścianki kanału przeciwległej do ścianki oznaczonej kolorem czerwonym na rys. 3c.

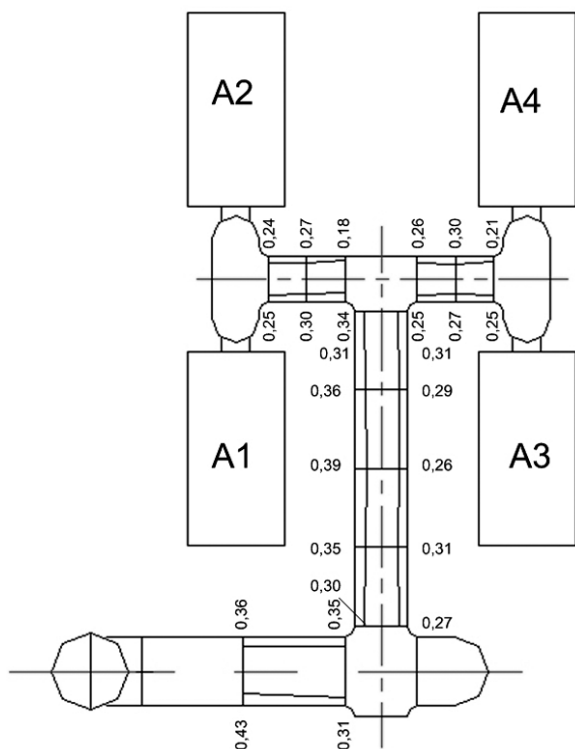
W próbce pokazanej na rys. 5, grubszy naskórek po wewnętrznej „cieplejszej stronie” kanału (kolor czerwony — rys. 3c) świadczy o tym, że przewodzenie ciepła przez ściankę formy nie odgrywa decydującej roli w zjawisku nie zrównoważonego przepływu tworzywa w formie. Regułą jest bowiem, że grubszy naskórek powstaje wówczas, gdy temperatura formy jest niższa [17]. Ponieważ obserwowana tendencja w kanałach stosowanej w badaniach formy jest odwrotna, można przypuszczać, iż w tym przypadku bardziej istotny czynnik stanowi kinetyka przepływu. Mianowicie, spiralny ruch tworzywa może być prawdopodobną przyczyną two-



Rys. 5. Próbka PE-LD + talk pobrana z tworzywa zestalonego w kanale doprowadzającym z widocznym naskórkiem — obserwacje w świetle spolaryzowanym, przekrój C-C (rys. 1), $v = 10$ mm/s
Fig. 5. PE-LD/talc sample, with visible skin layer, taken from the polymer solidified in the runner — in polarized light, C-C cross-section — see Fig. 1, $v = 10$ mm/s



Rys. 6. Próbka PE-HD pobrana z przekroju kanału doprowadzającego — przekrój C-C (rys. 1); warunki wtryskiwania: $T_w = 280$ °C, $T_f = 40$ °C, $v = 65$ mm/s
Fig. 6. PE-HD sample taken from the runner cross-section — C-C cross-section (Fig. 1); injection molding parameters: $T_w = 280$ °C, $T_f = 40$ °C, $v = 65$ mm/s



Rys. 7. Grubość naskórka (mm) w kanałach doprowadzających tworzywo do gniazd w sekcji A; w celu lepszego zobrazowania zmian grubości, jej wartości na rysunku powiększono trzykrotnie

Fig. 7. Skin layer thickness (in mm) in the runners to the cavities in section A; for better illustration of the thickness changes, its values in the figure are magnified 3 times

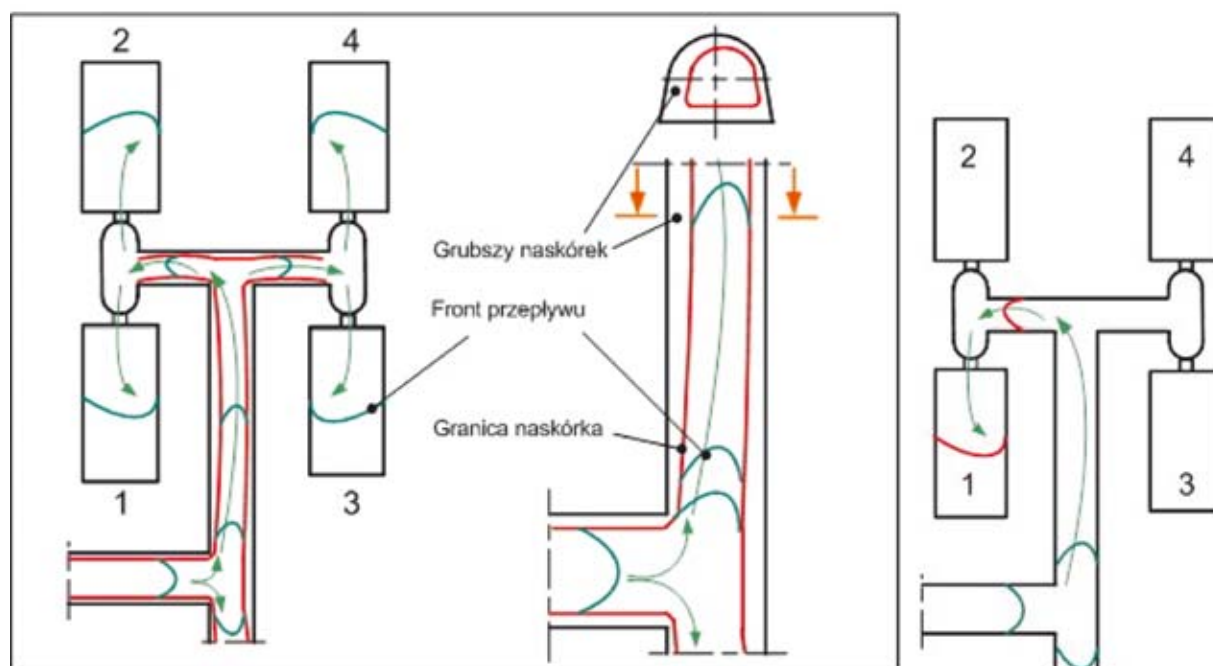
zenia naskórka różnej grubości po obu stronach kanału doprowadzającego.

W toku dalszych badań zmierzaliśmy grubość naskórka tworzywa zestalonego w kanałach sekcji A formy w przekrojach zaznaczonych na rys. 7. W pomiarach grubości wykorzystaliśmy oprogramowanie mikroskopu „Olympus BH-2”. Z danych przedstawionych na rys. 7 widoczna jest asymetria grubości naskórka, co potwierdza wyniki uprzednio omówionych badań (por. rys. 5).

Rezultaty zobrazowane na rys. 7 pozwalają na zbudowanie modelu procesu formowania się naskórka, zależnego od kinetyki ruchu tworzywa oraz asymetrii przepływu w kanałach. Po tej stronie kanału, gdzie front przepływu jest bardziej zaawansowany, naskórek jest cieńszy. Przedstawiono to schematycznie na rys. 8a. Ścianki kanałów od strony gniazda A1 położone są w strefie temperatury wyższej niż ścianki przeciwległe, co powinno w rezultacie powodować formowanie się cieńszego naskórka. W rzeczywistości jest jednak odwrotnie, gdyż, jak już wspomnieliśmy, ruch tworzywa w kanałach odgrywa w tym przypadku większą rolę niż warunki termiczne. Uprzywilejowany ruch spiralny tworzywa do gniazda nr 1 uwidoczniono na rys. 8b.

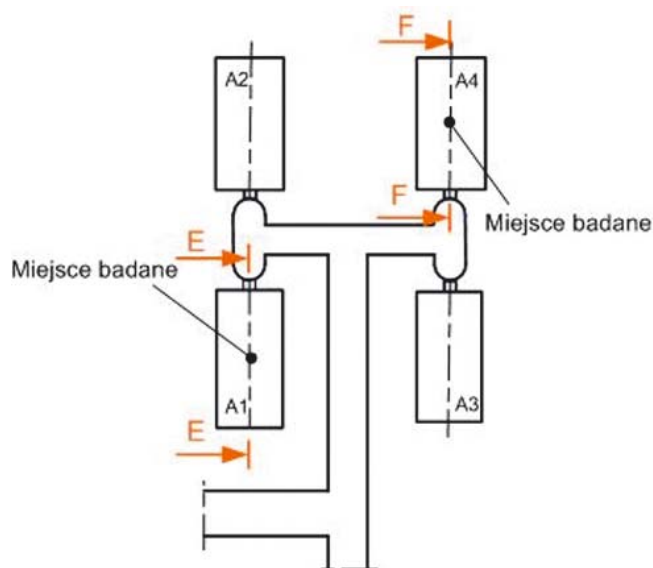
Próbki polipropylenowe — obserwacje mikroskopowe struktury

W celu oceny struktury wyprasek PP uzyskanych z różnych gniazd ucięliśmy próbki wzdłuż kierunku przepływu tworzywa w gnieździe formującym. Badane



Rys. 8. Model przepływu tworzywa w kanałach formy: a) asymetria przepływu tworzywa w kanałach warunkująca grubość naskórka, b) uprzywilejowany ruch spiralny tworzywa wpływającego do gniazda 1

Fig. 8. Model of the polymer flow in the runners: a) polymer flow asymmetry, determining the skin layer thickness, b) privileged spiral movement of the polymer flowing into cavity No. 1



Rys. 9. Miejsca pobrania próbek PP do badań mikroskopowych — przekroje wzdłużne

Fig. 9. Places of PP samplings for microscopic investigations — longitudinal sections

wypraski z polipropylenu wtryskiwano stosując dwie wartości temperatury formy: 30 °C lub 60 °C. Obserwowane przekroje, z których pobrano próbki, zaznaczono na rys. 9.

Struktura występująca w przekrojach wzdłużnych (rys. 10) jest podobna do klasycznej struktury PP obserwowanej przez wielu innych badaczy (por. np. [19, 20]). W pracach tych wykazano, że grubość zorientowanej warstwy rdzenia zwiększa się wraz z podwyższaniem zastosowanego w procesie wtryskiwania ciśnienia docisku. Strefa materiału zorientowanego jest widoczna w świetle spolaryzowanym jako jasny obszar, czego przyczynę stanowi znaczna dwójłomność optyczna.

Aby zbadać wpływ kolejności wypełniania gniazd na strukturę wyprasek, porównaliśmy próbki wyprasek z gniazda A1 (wypełnianego jako pierwsze) i A4 (wypełnianego jako ostatnie). W każdym przypadku struktura

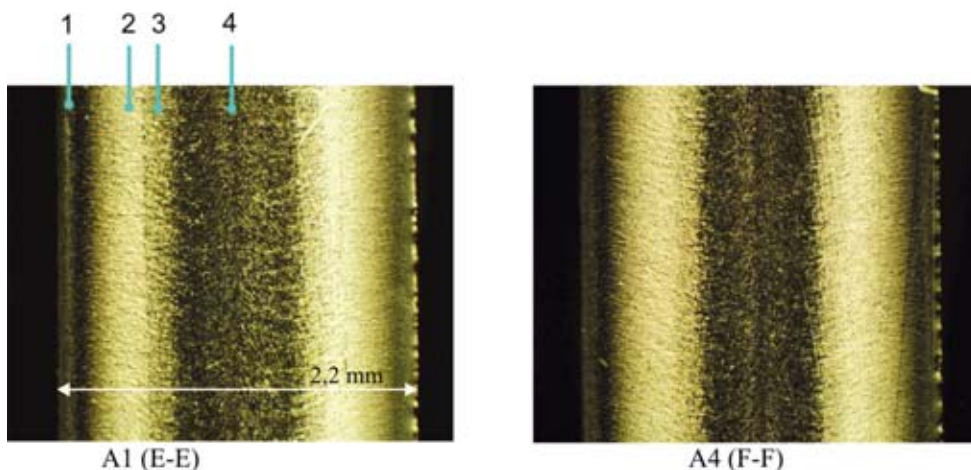
wypraski w przekroju wygląda podobnie i składa się z następujących warstw: naskórka uformowanego przy ścianie formy, następnie warstwy tworzywa zorientowanego stanowiącej zewnętrzną część rdzenia, warstwy przejściowej i wreszcie niezorientowanej warstwy rdzenia w środku wypraski. Widoczna różnica pomiędzy wypraskami z gniazd A1 i A4 dotyczy warstwy przejściowej, mianowicie w odniesieniu do wyprasek z gniazda A1 strefa ta jest wyraźniej zaznaczona i ma większą grubość.

Tworzywo w rdzeniu krzepnie pod wyższym ciśnieniem w gnieździe niż naskórek. Budowa rdzenia jest w dużym stopniu zdeterminowana przez wartość ciśnienia tworzywa w fazie docisku, kiedy to następuje przepływ kompensujący i reorientacja tworzywa [19, 20]. W pracy [16] wykazaliśmy już, że wypraski z gniazd wypełnianych wcześniej (A1) cechują się większą masą. Gniazda te są w większym stopniu wypełnione tworzywem podczas fazy wypełniania formy i w przypadku otrzymywanych z nich wyprasek wpływ ciśnienia docisku nie jest tak istotny, jak w odniesieniu do wyprasek z gniazd A4, wypełnianych na końcu. Tak więc warstwa silnie ukierunkowanego rdzenia ma wyraźniejsze granice w wypraskach z gniazda A4. Niższa temperatura formy w gnieździe A4 powoduje dodatkowo zwiększenie naprężeń stycznych podczas przepływu kompensującego w fazie docisku i wpływa na formowanie się zorientowanego rdzenia.

PODSUMOWANIE

Doświadczalnie potwierdzono, że niejednoczesne wypełnianie gniazd formy wtryskowej występuje także w przypadku równoległego układu kanałów doprowadzających, jaki zastosowano w badanej formie. Znajomość tego zjawiska może prowadzić do podjęcia decyzji o wykorzystaniu innego układu doprowadzenia tworzywa już na etapie konstrukcji formy.

Stosując metodę krótkich wtrysków ujawniono asymetrię przepływu tworzywa w gniazdach. Asymetria



Rys. 10. Struktura wyprasek z PP (obserwacje w świetle spolaryzowanym): 1 — naskórek, 2 — warstwa zorientowanego rdzenia, 3 — warstwa przejściowa, 4 — warstwa niezorientowanego rdzenia; temperatura formy 30 °C

Fig. 10. Structures of PP moldings (observations at polarized light): 1 — skin layer, 2 — oriented core layer, 3 — transient layer, 4 — non-oriented core layer; mold temperature 30 °C

obserwowana jest także w kanałach doprowadzających i objawia się w różnicy grubości warstwy naskórka oraz w liniach przepływu widocznych w strukturze krystalicznej wypraski. Przyczynami tego mogą być warunki termiczne w formie oraz kinetyka przepływu tworzywa w kanałach. Rozkład temperatury formy w płaszczyźnie podziału nie jest równomierny z powodu oddziaływania gorącego wlewka w centrum płyty formującej. Jest to jednym z czynników powodujących nierównoczesne wypełnianie gniazd. Mianowicie, gniazda umieszczone bliżej środka formy, gdzie panuje wyższa temperatura, są wypełniane w pierwszej kolejności. Stwierdzona asymetria przepływu tworzywa pokazuje jednak, że na wypełnianie gniazd formy bardziej niż temperatura oddziałują zjawiska kinetyki przepływu, związane ze zmianą jego kierunku przy przejściu z jednego do drugiego wzajemnie prostopadłych kanałów (spiralny tor od kanału wlewowego do gniazda numer 1).

Zaobserwowano różnice w strukturze wyprasek z różnych gniazd — w przypadku wyprasek z gniazd wypełnianych wcześniej grubsza jest strefa przejściowa pomiędzy zorientowaną i niezorientowaną warstwą rdzenia. Struktura wyprasek determinuje ich właściwości mechaniczne, a więc nierównomierne wypełnianie gniazd może prowadzić do różnic tych właściwości.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005—2006 jako projekt badawczy nr 3 T08E 032 28.

Autorzy wyrażają podziękowania Wydziałowi Inżynierii Polimerów Uniwersytetu Minho w Guimarães w Portugalii za możliwość wykonania badań mikroskopowych.

LITERATURA

1. Beaumont J. P., Nagel R., Sherman R.: „Successful Injection Moulding”, Hanser Publishers, Munich 2002, str. 115—138.
2. Menges G., Michaeli W., Mohren P.: „How to Make Injection Moulds”, Hanser Publishers, Munich 2001, str. 143—256.
3. Stoeckhert K., Menning G.: „Mould-Making Handbook”, Hanser Publishers, Munich 1998, str. 17—28.
4. Pötsch G., Michaeli W.: „Injection Moulding. An Introduction”, Hanser Publishers, Munich—Vienna—New York 1995, str. 89—98.
5. Malloy R. A.: „Plastic Part Design for Injection Moulding. An Introduction”, Hanser Publishers, Munich—Vienna—New York 1994, str. 15—20, 43.
6. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku”, WNT, Warszawa 1984, str. 199—206.
7. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”, WNT, Warszawa 1984, str. 138—200.
8. Bociąga E.: *Polimery* 2005, **50**, 10.
9. Beaumont J. P.: „Runner and Gating Design Handbook. Tools for Successful Injection Moulding”, Hanser, Munich, Cincinatti 2004, str. 82, 94—102, 113.
10. Casaldi H. E., Michel T.: „Process Window as Effected by Shear Induced Flow Imbalance in Multicavity Moulds”, SPE ANTEC Tech. Papers 2001, 3112.
11. Cooney R., Neil D., Pomorski L.: „An Investigation of Part Variation in Multi-Cavity Pressure Control”, SPE ANTEC Tech. Papers 2001, 3116.
12. Beaumont Runner Tech. Inc., <http://meltflipper.com>.
13. Makowski M.: „Konstrukcja układów wlewowych dla tworzyw częściowo krystalicznych” w pracy zbiorowej „Nowoczesne formy wtryskowe. Problemy konstrukcji i użytkowania” (red. Zawistowski H.), Plastech, Warszawa 2001, str. 179.
14. Su G. Y., Yokoi H., Yang W. M.: „A Study on Filling Imbalance of Plastic Injection Moulding in Multi-cavity Mould with «H» Pattern Runner System”, PPS 2003, Greece.
15. Bociąga E., Jaruga T., Koszkuł J.: „Plastic flow investigation in multicavity injection mould”, 12th International Scientific Conference „Achievements in Mechanical and Materials Engineering — AMME 2003”, Gliwice—Zakopane 2003, materiały konferencyjne, str. 107.
16. Bociąga E., Jaruga T.: „Process of cavity filling in a multicavity injection mould”, Polymer Processing Society Annual Meeting PPS-20, Ohio 2004, paper 217.
17. Brito A. M., Cunha A. M., Pouzada A. S.: *Int. Polym. Processing* 1991, **VI**, nr 4, 370.
18. Viana J. C., Cunha A. M., Billon N.: *Polymer* 2002, **43**, 4185.
19. Pontes A. J., Oliceira M. J., Pouzada A. S.: „Studies on the Influence of the Holding Pressure on the Orientation and Shrinkage of Injection Molded Parts”, SPE ANTEC Tech. Papers 2002, paper 98.
20. Pontes A. J., Oliceira M. J., Pouzada A. S.: „The Effect of Holding Pressure on the Shrinkage and Birefringence of Injection Molded Polypropylene Plates”, Materials Science Forum 2004, nr 455—456, 814.
21. Viana J. C.: *Polymer* 2004, **45**, 993.
22. Banasiak A., Sterzyński T.: *Polimery* 2004, **49**, 442.
23. Stabik J.: *Polimery* 2004, **49**, 712.
24. Postawa P.: „Wpływ rozkładu temperatury powierzchni formy na stopień krystaliczności wyprasek wtryskowych” w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo” (red. Koszkuł J., Bociąga E.), Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, str. 211.
25. Bociąga E.: „Maksymalne skrócenie czasu cyklu wtryskiwania dzięki zastosowaniu wysokowydajnych form wtryskowych i procesów wtryskiwania”, X Profesorskie Warsztaty Naukowe „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Lublin—Kazimierz Dolny 2005, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005, str. 15.
26. Bociąga E., Dybała B., Frankiewicz M.: „Hiper moulding”. Opis projektu, *TS Raport* 2005, **38**, 32.
27. „Hiper moulding” — Projekt Europejski, *TS Raport* 2005, **37**, 67.
28. Praca zbiorowa: „Pomiary termowizyjne w praktyce” (red. Madura H.), Agenda Wydawnicza PAKu, Warszawa 2004, str. 38—165.
29. Heamsley D. A.: „The light microscopy of synthetic polymers”, Oxford University Press, Royal Microscopical Society 1984, str. 49—50.