

Badania symulacyjno-doświadczalne nierównomiernego wypełniania wielogniazdowych form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie

Krzysztof Wilczyński^{1), *)}, Krzysztof J. Wilczyński¹⁾, Przemysław Narowski¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.411

Streszczenie: Przeprowadzono badania doświadczalne zjawiska nierównomiernego wypełniania wielogniazdowych form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie, podczas wtryskiwania tworzyw amorficznych i częściowo krystalicznych, z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych kanałów doprowadzających. Wykonano badania symulacyjne wpływu warunków wtryskiwania (natężenia przepływu i temperatury chłodzenia) na stopień nierównomierności wypełnienia formy.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, formy wtryskowe, nierównomierne wypełnianie formy, symulacja.

Experimental and simulation studies on filling imbalance in geometrically balanced runner systems of multi-cavity injection molds

Abstract: Filling imbalance in geometrically balanced runner systems of multi-cavity injection molds has been studied experimentally during the injection of amorphous and semicrystalline plastic materials by using various runner geometries. The simulation experiments have been performed using Autodesk Moldflow software to analyze the effect of the injection molding conditions (flow rate, cooling temperature) on the degree of mold filling imbalance. Multi-objective Evolutionary Algorithms are suggested for the optimization of the runner systems in multi-cavity injection molds.

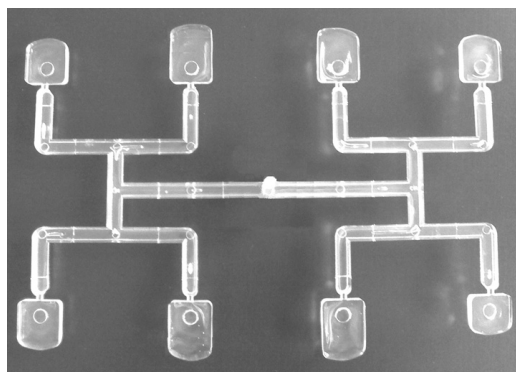
Keywords: injection molding, injection molds, mold filling imbalance, simulation.

Zjawisko nierównomiernego wypełniania form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie jest znane z praktyki przemysłowej. Występuje głównie w formach z ośmioma gniazdami (lub z większą ich liczbą), do których tworzywo jest doprowadzane kanałami tworzącymi układ w kształcie litery H. W takich formach gniazda wewnętrzne zwykle są wypełniane szybciej (rys. 1). Przepływ w takich formach można zrównoważyć w wyniku geometrycznej korekty kanałów doprowadzających z zastosowaniem rozwiązań konstrukcyjnych typu MeltFlipper [1].

Zjawisko nierównomiernego wypełniania form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie było przedmiotem prac doświadczalnych i teoretycznych [1–6], przy czym najważniejsze były prace Beaumonta, autora koncepcji korekty geometrycznej kanałów doprowadzających – MeltFlipper. Korekta polega na zmianie drogi płynięcia tworzywa, w wyniku podniesienia strugi tworzywa i następnie jej opuszczenia, w miejscu rozgałęzienia kanałów (rys. 2). Taka miejscowa zmiana drogi

płynięcia zapobiega tworzeniu się przepływu niesymetrycznego.

Przepływ polimerów w formie wtryskowej jest dosyć złożony, gdyż są to ciecze nienewtonowskie, ich lepkość zmniejsza się ze wzrostem szybkości ścinania i temperatury. Przepływ tworzywa definiują: natężenie przepływu tworzywa i warunki wymiany ciepła z otoczeniem. Podstawową przyczyną nierównomiernego wypełniania

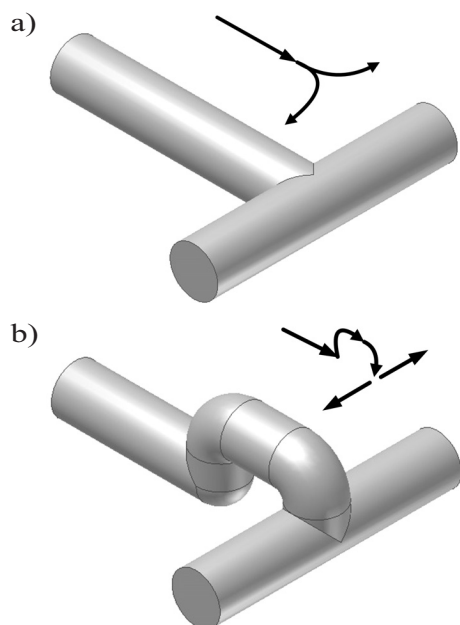


Rys. 1. Przykład nierównomiernego wypełnienia formy ośmiogniazdowej zrównoważonej geometrycznie

Fig. 1. Example of filling imbalance in geometrically balanced feed system of eight-cavity injection mold

¹⁾ Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa.

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: k.wilczynski@wip.pw.edu.pl



Rys. 2. Kształt geometryczny kanałów doprowadzających: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 2. Geometry of runners: a) simple runner, b) overturn geometry

form zrównoważonych geometrycznie jest nieliniowy rozkład prędkości tworzywa w kanałach doprowadzających, generujący nieliniowy rozkład szybkości ścinania, wpływającej na lepkość tworzywa. Te dwa czynniki, szybkość ścinania i lepkość, determinują wydzielanie się ciepła podczas przepływu, zgodnie z zależnością:

$$Q = \eta(\dot{\gamma}, T)\dot{\gamma}^2 \quad (1)$$

gdzie: Q – ilość ciepła wydzielającego się w jednostce objętości tworzywa w jednostce czasu [$J/(m^3 \cdot s) = W/m^3$], $\eta(\dot{\gamma}, T)$ – lepkość w funkcji szybkości ścinania i temperatury ($Pa \cdot s$), $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania ($1/s$).

Wzrost szybkości ścinania powoduje zmniejszenie lepkości, a więc także zmniejszenie wydzielania ciepła; jednocześnie wzrost szybkości ścinania – zgodnie z równaniem (1) – zwiększa (do potęgi drugiej) wydzielanie się ciepła. To, który z wymienionych czynników przeważa zależy od właściwości reologicznych przetwarzanego tworzywa. Takie złożone, nienewtonowskie i niezotermiczne, a przy tym nieustalone przepływy można analizować jedynie z zastosowaniem symulacji numerycznych [7].

Pierwsze, ograniczone, a przy tym dość uproszczone próby symulacji numerycznych zjawiska nierównomiernego wypełniania form zrównoważonych geometrycznie wykorzystywały narzędzia obliczeniowe mechaniki płynów (ang. CFD, *Computational Fluid Dynamics*), typu FIDAP [8]. Dopiero stosunkowo niedawno firmy specjalizujące się w tworzeniu oprogramowania do symulacji procesu wtryskiwania – Autodesk Moldflow [9] i Core-Tech [10] – opracowały rozwiązania umożliwiające całościową symulację tego zjawiska. Uzyskano to, m.in.,

dzięki uściśleniu opisu wymiany ciepła podczas przepływu, uwzględnieniu efektów dynamicznych przepływu oraz zastosowaniu trójwymiarowej, czworosciennej siatki elementów skończonych. Symulacje wykonane za pomocą programów Autodesk Moldflow [11, 12] i Moldex [13–15] pozwoliły na zaawansowaną analizę zjawiska nierównomiernego wypełniania form, a także analizę płynięcia w kanałach z korektą geometryczną typu Melt-Flipper. Ostatnio zaproponowano nową, bezsiatkową metodę modelowania omawianego zjawiska [16].

Obok rozwiązania podstawowego z jednym elementem korekty geometrycznej kanału, Beaumont [1] zaproponował rozwiązania z korektą podwójną, a także rozwiązania z zastosowaniem kołowego elementu rozpraszającego tworzywo w kierunku obwodowym. Rozwiązań tych nie poddawano jednak ani badaniom symulacyjnym, ani doświadczalnym. Odminną koncepcję korekty kanałów doprowadzających, polegającą na zastąpieniu kanałów prostoliniowych kanałami profilowanymi, przedstawił niedawno Huang [17].

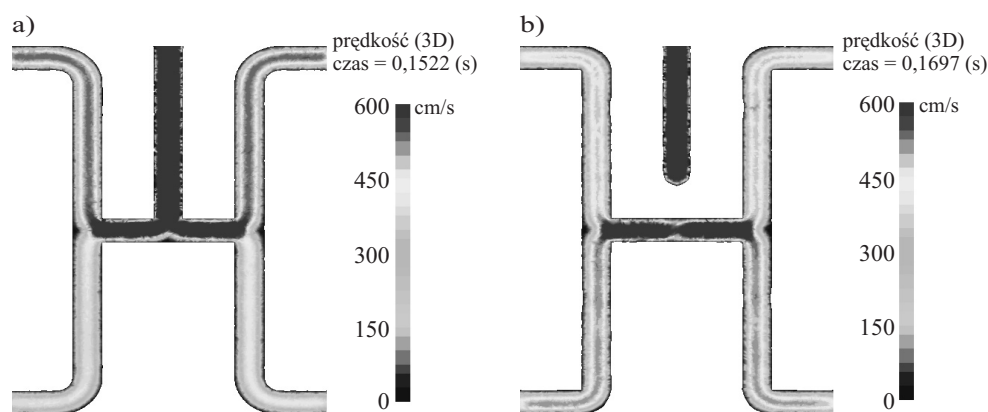
Oprócz zastosowania geometrycznej korekty kanałów doprowadzających, podejmowano też próby rozwiązań innego typu. Petzold [18] i Fernandes [19] przedstawili koncepcje polegające na optymalizowaniu rozkładu temperatury w przestrzeni przepływu tworzywa i wokół niej. Rhee [20, 21] zaproponował równoważenie przepływu dzięki zastosowaniu zaworów dławiących w kanałach doprowadzających, uruchamianych w warunkach rosnącej temperatury formy. Schwenk [22] wskazywał na znaczenie odpowietrzania formy przy równoważeniu przepływu.

Badania dotyczące nierównomiernego wypełniania form wtryskowych prowadzono głównie w odniesieniu do tworzyw termoplastycznych. Warto więc zwrócić uwagę na pracę Gadleya [23], który potwierdził występowanie zjawiska nierównomiernego wypełniania form w procesie wtryskiwania ciekłych elastomerów silikonowych (LSR). Ważne też są opracowania wskazujące na wpływ nierównomiernego wypełniania form na właściwości użytkowe wyrobów wtryskiwanych [24–27], jak również dotyczące formowania się linii łączenia strumieni tworzywa w formie wielogniazdowej [28].

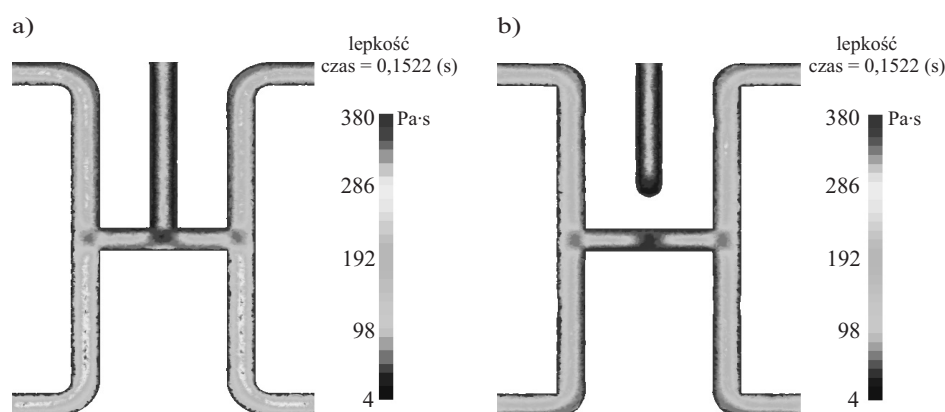
W ramach przedstawionej pracy wykonano w szerokim zakresie badania doświadczalne zjawiska nierównomiernego wypełniania form wtryskowych, z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych korygujących kanały doprowadzające, jak również podstawowe badania symulacyjne wpływu warunków wtryskiwania na omawiane zjawisko.

BADANIA SYMULACYJNE

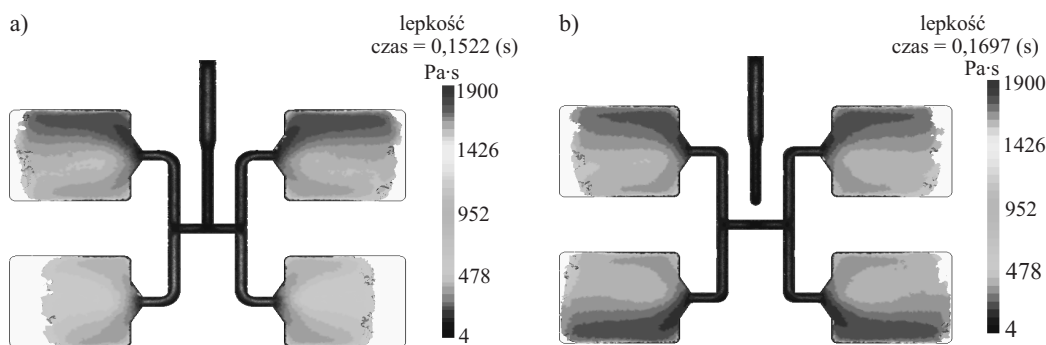
W celu zobrazowania zjawiska nierównomiernego wypełniania form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie wykonano obliczenia symulacyjne przepływu w tradycyjnej formie wtryskowej i w formie z korektą geometryczną kanału doprowadzającego (rys. 2). Bada-



Rys. 3. Rozkład prędkości w kanałach doprowadzających: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 3. Velocity distribution in the runners: a) simple runner, b) overturn geometry



Rys. 4. Rozkład lepkości w kanałach doprowadzających: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 4. Viscosity distribution in the runners: a) simple runner, b) overturn geometry



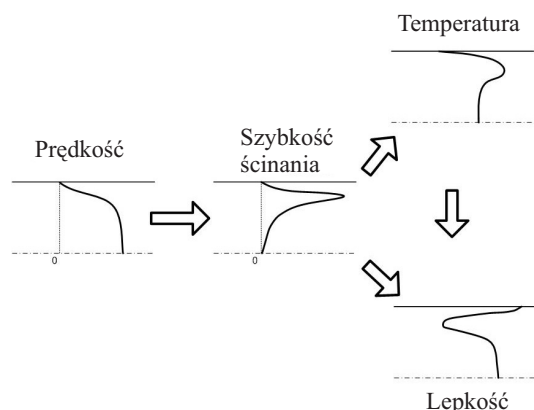
Rys. 5. Rozkład lepkości i frontu płynięcia tworzywa w gniazdach formy: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 5. Viscosity distribution and melt flow front in the cavities: a) simple runner, b) overturn geometry

no przepływ poli(tereftalanu butylenu) PBT Valox 337. Zastosowano model Crossa-WLF, zdefiniowany przez wykładnik płynięcia $n = 0,2139$, temperaturę zeszklenia $T_g = 49,85$ °C. Przyjęto, że temperatura formy jest równa $T_f = 63$ °C, temperatura wtryskiwanego tworzywa $T_{wt} = 252$ °C, a natężenie przepływu tworzywa $Q = 2,5$ cm³/s, $Q = 5$ cm³/s i $Q = 63$ cm³/s. Zastosowano program Autodesk Moldflow Insight 2010 [9].

Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rys. 3–8. Na rys. 3 pokazano rozkład prędkości przepływu w kanale prostym i w kanale skorygowanym. W kanale

prostym rozkład prędkości przepływu jest nierównomierny (rys. 3a). Korekta geometryczna kanału prowadzi do zrównoważenia tego rozkładu (rys. 3b). Pochodna rozkładu prędkości określa rozkład szybkości ścinania, warunkujący z kolei rozkład lepkości w kanałach doprowadzających i gniazdach formy, a w rezultacie — kształt i położenie frontu przepływu tworzywa, czyli sposób wypełniania formy (rys. 4, 5).

Uzyskane wyniki wskazują wyraźnie, że przyczyną nierównomiernego wypełniania gniazd formy jest nierównomierny rozkład prędkości przepływu, a więc także



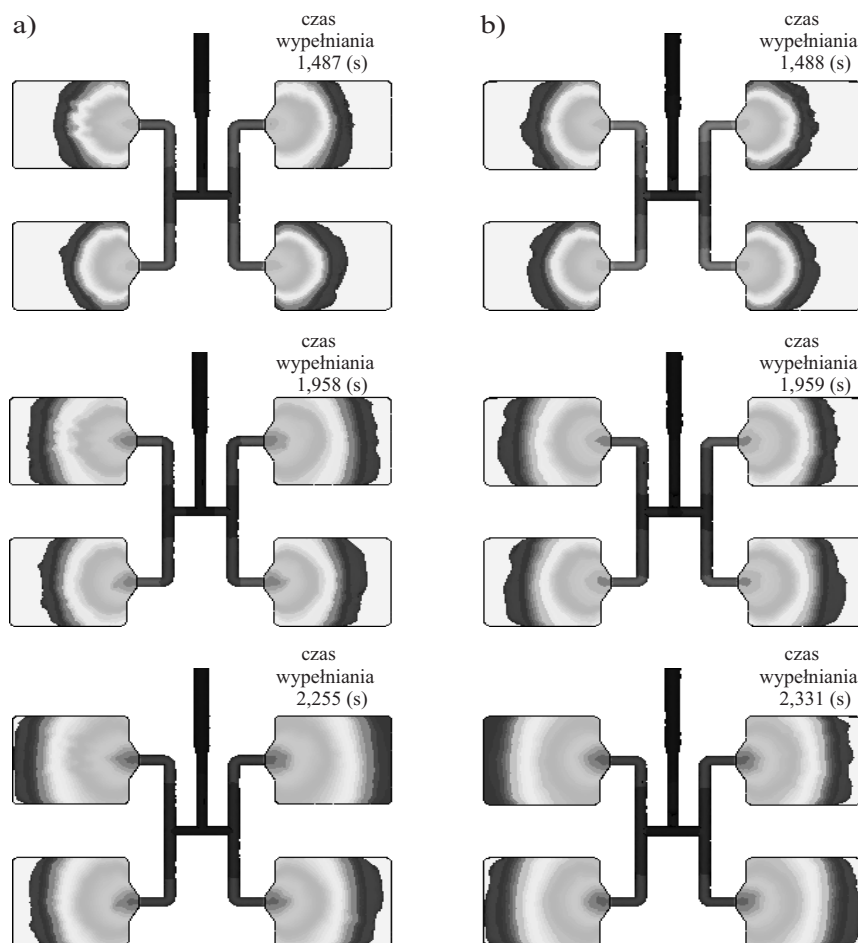
Rys. 6. Schemat wyjaśniający zjawisko nierównomiernego wypełnienia form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie
 Fig. 6. Explanation scheme for filling imbalance in geometrically balanced feed system of injection molds

nierównomierny rozkład szybkości ścinania, w wyniku czego, również rozkład temperatury jest nierównomierne. W strudze tworzywa pojawiają się obszary o większej i mniejszej jego lepkości. Tworzywo o mniejszej lepkości dopływa do kanałów wewnętrznych, a tworzywo o większej – do kanałów zewnętrznych. Wyjaśnienie zjawiska nierównomiernego wypełnienia form zrównowa-

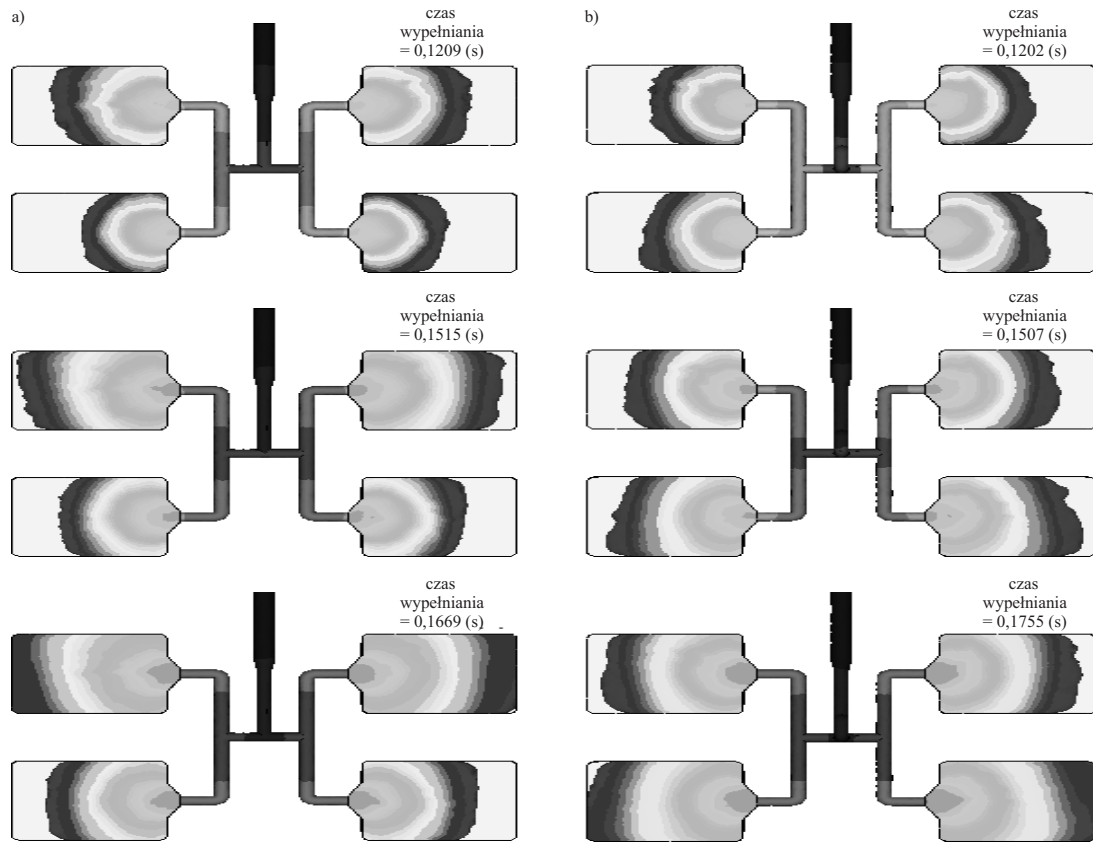
żonych geometrycznie schematycznie przedstawia rys. 6.

Na rys. 7 i 8 przedstawiono rozkład frontu płynięcia tworzywa w formie o kanale prostym i w formie o kanale korygowanym, przy małym natężeniu przepływu $Q = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$ (rys. 7) i dużym natężeniu przepływu $Q = 63 \text{ cm}^3/\text{s}$ (rys. 8). Przepływ w formie o kanale korygowanym jest bardziej zrównoważony, ale też wyraźnie widać wpływ natężenia przepływu na wypełnianie formy. W formie o kanale prostym szybciej wypełniają się gniazda wewnętrzne, przy czym stopień nierównomierności wypełnienia zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa (rys. 7a i 8a). W formie o kanale korygowanym szybciej wypełniają się gniazda zewnętrzne, jednak nierównomierność wypełnienia w mniejszym stopniu zależy od natężenia przepływu tworzywa i zwiększa się tylko nieznacznie (rys. 7b i 8b).

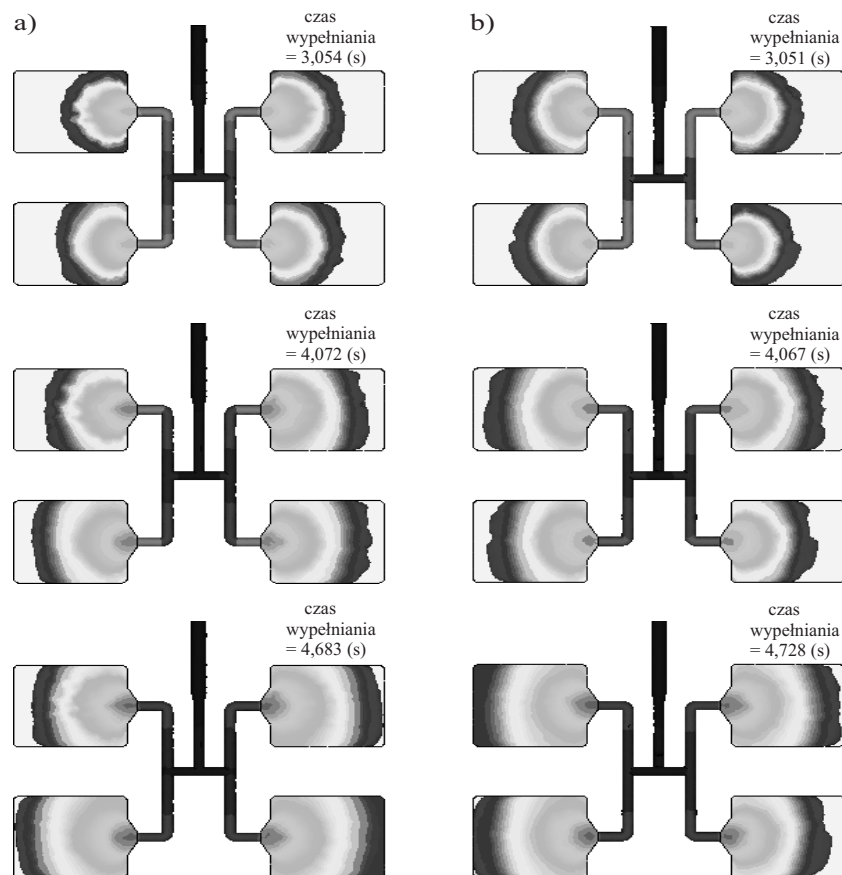
Na rys. 9 przedstawiono wyniki symulacji wtryskiwania przy bardzo małym natężeniu przepływu tworzywa ($Q = 2,5 \text{ cm}^3/\text{s}$). W tym przypadku przepływ jest bardziej zrównoważony, ale można tu także zauważyć odmienny sposób wypełniania formy. Mianowicie, w formie o kanałach prostych szybciej wypełniają się gniazda zewnętrzne, natomiast w formie o kanałach korygowanych szybciej wypełniają się gniazda wewnętrzne.



Rys. 7. Rozkład frontu płynięcia tworzywa w warunkach natężenia przepływu $Q = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 7. Distribution of melt flow front at a flow rate $Q = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$: a) simple runner, b) overturn geometry



Rys. 8. Rozkład frontu płynięcia tworzywa w warunkach natężenia przepływu $Q = 63 \text{ cm}^3/\text{s}$: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 8. Distribution of melt flow front at a flow rate $Q = 63 \text{ cm}^3/\text{s}$: a) simple runner, b) overturn geometry



Rys. 9. Rozkład frontu płynięcia tworzywa w warunkach natężenia przepływu $Q = 2.5 \text{ cm}^3/\text{s}$: a) kanał prosty, b) kanał korygowany
 Fig. 9. Distribution of melt flow front at a flow rate $Q = 2.5 \text{ cm}^3/\text{s}$: a) simple runner, b) overturn geometry

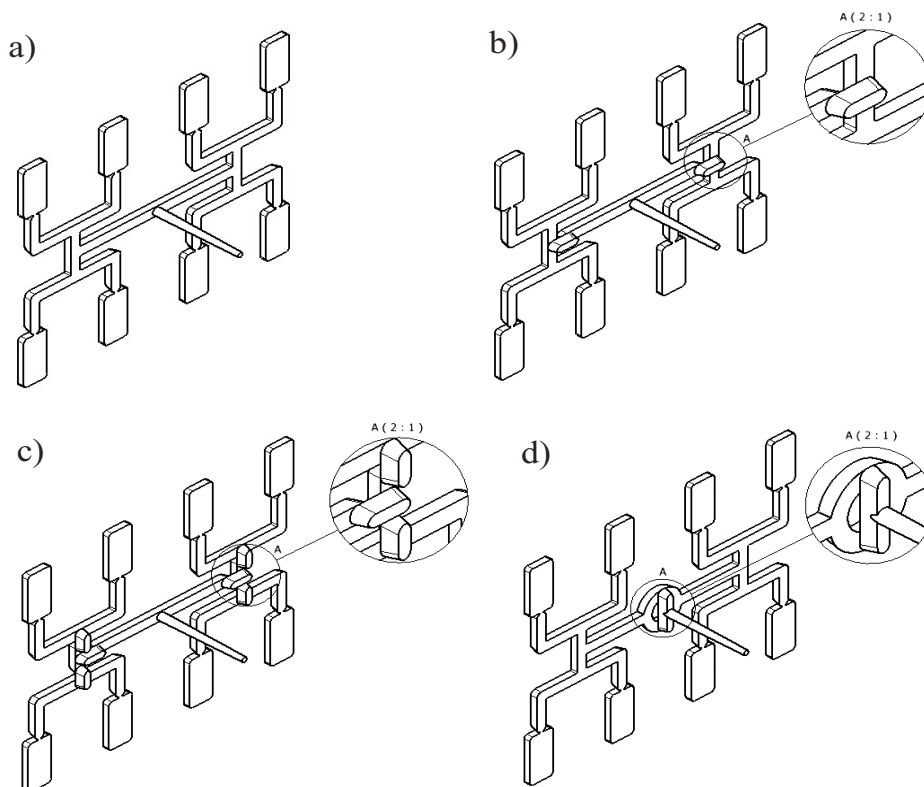
Na podstawie wyników badań symulacyjnych stwierdzono, że sposób wypełniania formy zależy od rozkładu parametrów charakteryzujących przepływ tworzywa w kanałach doprowadzających układu wlewowego formy, a więc od rozkładu prędkości przepływu tworzywa, szybkości ścinania, temperatury i lepkości tworzywa. Ten rozkład zależy od warunków przepływu tworzywa, np. natężenia przepływu i warunków chłodzenia, ale także od właściwości reologicznych i termodynamicznych tworzywa, np. zależności lepkości od szybkości ścinania i temperatury oraz dyfuzyjności cieplnej i współczynnika przejmowania ciepła.

Trudno więc przewidzieć sposób wypełniania formy bez wykonania symulacji numerycznych, w odniesieniu do określonego przepływu, definiowanego warunkami technologicznymi oraz charakterystykami materiałowymi i geometrycznymi przepływu, a także formułować wnioski o charakterze ogólnym. Modelowanie zjawiska

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Celem badań doświadczalnych była analiza zjawiska nierównomiernego wypełniania form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie, w różnych warunkach przetwórstwa. Program badań obejmował wtryskiwanie różnych tworzyw — w różnych warunkach technologicznych procesu — do ośmiogniazdowej formy, wyposażonej w układ kanałów doprowadzających o zróżnicowanej konstrukcji.

Wykorzystano wtryskarke hydrauliczną ULTRA-TECH typu UT.90.T (PONAR Żywiec). Zastosowano, specjalnie w tym celu skonstruowaną, ośmiogniazdową formę wtryskową z wymiennymi wkładkami, umożliwiającymi stosowanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowego. Rozwiązania konstrukcyjne układów wlewowych przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Rozwiązania układu wlewowego: a) kanał prosty, b) kanał z korektą jednokrotną, c) kanał z korektą dwukrotną, d) kanał z korektą obwodową

Fig. 10. Runner layouts: a) simple runner, b) single overturn geometry, c) double overturn geometry, d) circular overturn geometry

nierównomiernego wypełniania form zrównoważonych geometrycznie, mimo dostępności zaawansowanego oprogramowania Autodesk Moldflow [9] i CoreTech [10], nie jest łatwe i wymaga starannego nakładania siatki elementów skończonych oraz odpowiedniego doboru warunków wtryskiwania i charakterystyk materiałowych [29].

Wtryskiwano tworzywa o różnej charakterystyce reologicznej i termodynamicznej:

- bezpostaciowy polistyren wysokoudarowy (PS-HI);
- częściowo krystaliczny poli(tereftalan butylenu) (PBT);
- częściowo krystaliczny polietylen małej gęstości (PE-LD).

T a b e l a 1. Charakterystyka badanych tworzyw

T a b l e 1. Characteristics of tested polymers

Lp.	Rodzaj tworzywa	Nazwa handlowa	Producent	Wskaźnik szybkości płynięcia MFR, g/10 min			Temperatura mięknięcia wg Vicata, °C	
				wartość MFR	warunki badania		metoda	
					temperatura, °C	obciążenie, kg	A50, 50 °C/h, 10 N	B50, 50 °C/h, 50 N
1.	PS-HI	Edistir R 540E	Polimieri Europa	4	200	5	100	92
2.	PBT	CCP PBT 4130	CCP	16,2	250	2,16	—	—
3.	PE-LD	INEOS LL02009AA	INEOS	0,9	190	2,16	100	—

Charakterystykę badanych tworzyw przedstawiono w tabeli 1.

W przypadku każdego z wymienionych tworzyw przeprowadzono próby wypełniania gniazd formy, z zastosowaniem czterech różnych rozwiązań konstrukcyjnych kanałów doprowadzających układu wlewowego:

– układu standardowego, oznaczonego jako Geometria_S (rys. 10a);

– układu z jednokrotną korektą geometryczną kanałów w rozgałęzieniu między pierwszym a drugim kanałem, oznaczonego jako Geometria_1 (rys. 10b);

– układu z dwukrotną korektą geometryczną kanałów w rozgałęzieniu między pierwszym a drugim kanałem oraz między drugim a trzecim kanałem, oznaczonego jako Geometria_2 (rys. 10c);

– układu z zastosowaniem kołowego elementu rozpraszającego tworzywo w kierunku obwodowym, między kanałem wlewowym a pierwszym kanałem, oznaczonego jako Geometria_3 (rys. 10d).

Próby wtryskiwania każdorazowo wykonywano przy trzech prędkościach wtrysku: 20 mm/s, 50 mm/s i 80 mm/s, które stanowią, odpowiednio, 20 %, 50 % i 80 % maksymalnej prędkości wtrysku $V_{maks.} = 100$ mm/s, uzyskiwanej na stosowanej wtryskarce.

Warunki wtryskiwania zestawiono w tabeli 2.

T a b e l a 2. Warunki wtryskiwania

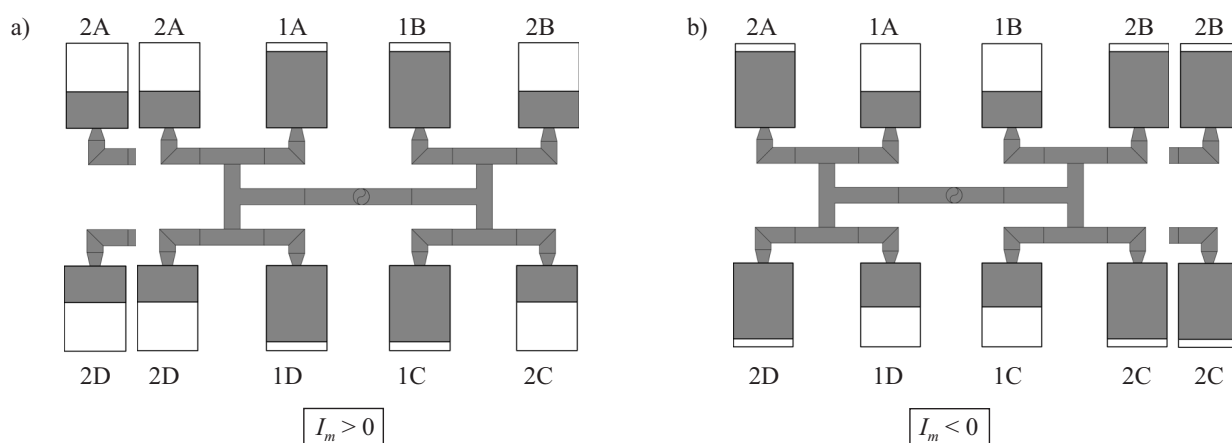
T a b l e 2. Injection conditions

Parametry procesu	Tworzywo		
	PS-HI	PBT	PE-LD
Temperatura dyszy, °C	220	270	200
Prędkość wtrysku, mm/s	20 50 80	20 50 80	20 50 80
Ciśnienie docisku, MPa	0		
Czas docisku, s	0		
Czas chłodzenia, s	20		
Obroty ślimaka, 1/min	140		
Przeciwcisnienie, MPa	0,2		
Temperatura formy, °C	30		

Badania polegały na częściowym, ok. 80-proc. wypełnianiu gniazd formy, uzyskiwanym w wyniku zredukowania fazy docisku (czasu i ciśnienia docisku).

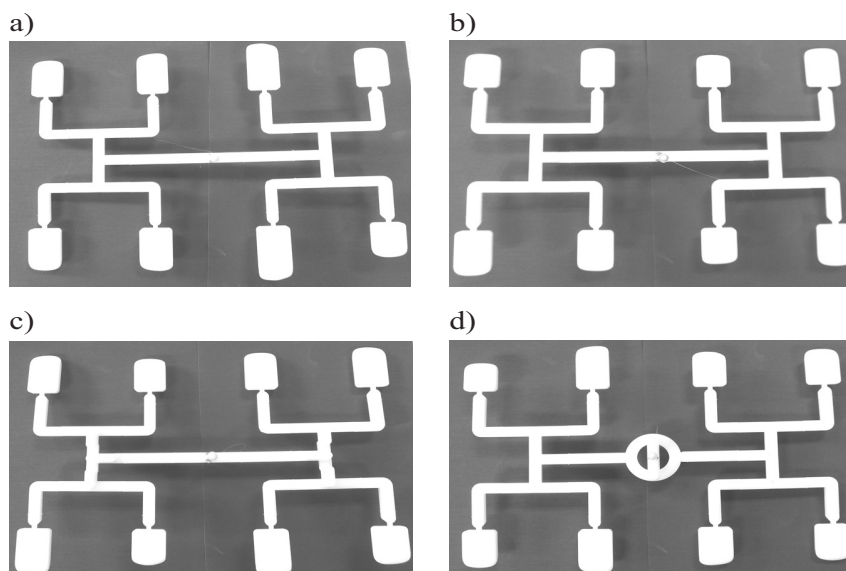
Nierównomierność wypełniania formy określano na podstawie masy wyprasek w poszczególnych gniazdach formy. Stopień nierównomierności zdefiniowano równaniem (2) (rys. 11):

$$I_m = (1 - m_2/m_1) \quad (2)$$



Rys. 11. Definiowanie stopnia nierównomierności wypełnienia formy: a) $I_m > 0$ ($m_1 > m_2$), szybsze wypełnianie gniazd wewnętrznych, b) $I_m < 0$ ($m_1 < m_2$), szybsze wypełnianie gniazd zewnętrznych

Fig. 11. Defining of filling imbalance: a) $I_m > 0$ ($m_1 > m_2$), faster filling of internal cavities, b) $I_m < 0$ ($m_1 < m_2$), faster filling of external cavities



Rys. 12. Próbkki polistyrenu wysokoudarowego (PS-HI) uzyskane z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowego: a) Geometria_S, b) Geometria_1, c) Geometria_2, d) Geometria_3

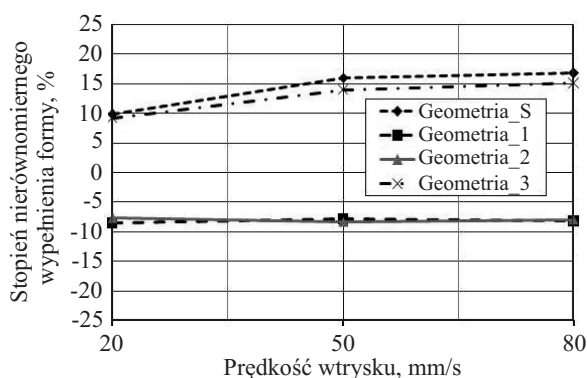
Fig. 12. High impact polystyrene (PS-HI) moldings obtained by using different runner layouts: a) Geometry_S, b) Geometry_1, c) Geometry_2, d) Geometry_3

gdzie: I_m – stopień nierównomierności wypełnienia formy, m_1 – średnia masa wypraski z gniazd wewnętrznych 1, m_2 – średnia masa wypraski z gniazd zewnętrznych 2.

Stopień nierównomierności wypełnienia formy (I_m) określa różnicę między wypełnieniem formy w gniazdach 1 i 2. I_m przybiera wartości dodatnie w przypadku pokazanym na rys. 11a i wartości ujemne w przypadku przedstawionym na rys. 11b. Wartości dodatnie I_m ($m_1 > m_2$) wskazują na szybsze wypełnianie gniazd wewnętrznych, a wartości ujemne ($m_1 < m_2$) – na szybsze wypełnianie gniazd zewnętrznych.

Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na rys. 12–17.

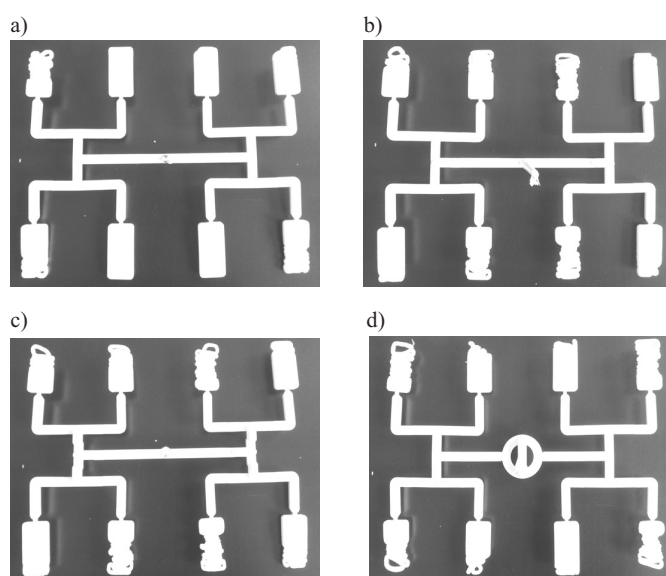
Na rys. 12, 13 przedstawiono wyniki badań wtryskiwania bezpostaciowego polistyrenu wysokoudarowego



Rys. 13. Stopień nierównomierności wypełnienia formy podczas wtryskiwania polistyrenu wysokoudarowego (PS-HI)

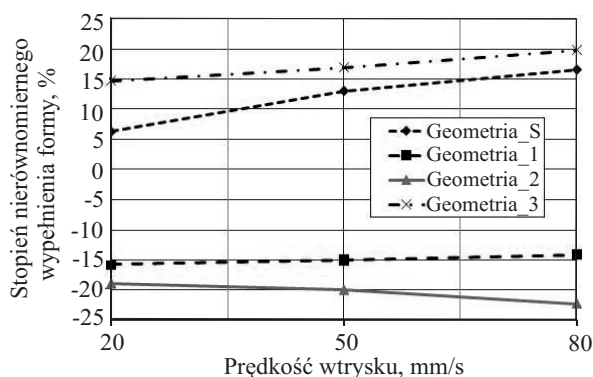
Fig. 13. Degree of mold filling imbalance during the injection of high impact polystyrene (PS-HI)

(PS-HI). Na rysunku 12 pokazano przykładowe, wyjęte z formy próbki tworzywa, uzyskane z zastosowaniem czterech różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowego. Rysunek 13 przedstawia zależność stopnia nierównomierności wypełnienia formy od zastosowania różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowego, w warunkach różnego natężenia przepływu tworzywa



Rys. 14. Próbkki poli(tereftalanu butylenu) (PBT) uzyskane z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowego: a) Geometria_S, b) Geometria_1, c) Geometria_2, d) Geometria_3

Fig. 14. Poly(butylene terephthalate) (PBT) moldings obtained by using different runner layouts: a) Geometry_S, b) Geometry_1, c) Geometry_2, d) Geometry_3

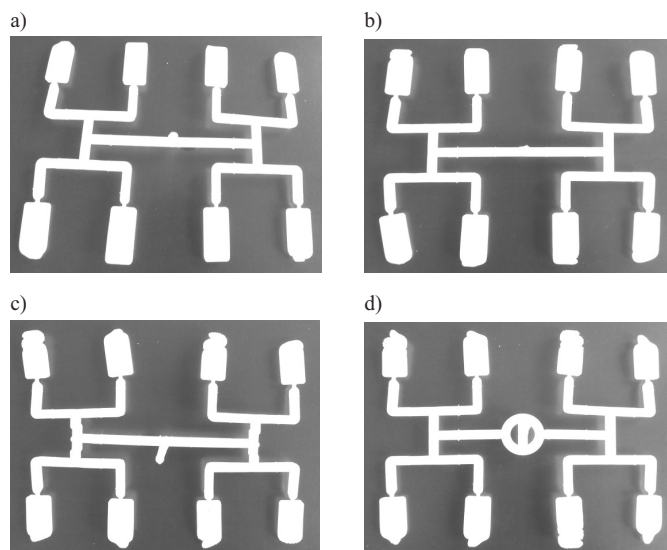


Rys. 15. Stopień nierównomierności wypełnienia formy podczas wtryskiwania poli(tereftalanu butylenu) (PBT)

Fig. 15. Degree of mold filling imbalance during the injection of poly(butylene terephthalate) (PBT)

wa. W przypadku rozwiązania standardowego (Geometria_S) szybciej wypełniają się gniazda wewnętrzne ($I_m > 0$) i stopień nierównomierności wypełnienia zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa. W układzie z jednokrotną korektą geometryczną kanałów (Geometria_1) szybciej wypełniają się gniazda zewnętrzne ($I_m < 0$), a stopień nierównomierności wypełnienia w zasadzie nie zależy od natężenia przepływu tworzywa. Podobne wyniki otrzymano wtedy, gdy zastosowano układ z dwukrotną korektą kanałów (Geometria_2). W układzie z kołowym elementem rozprowadzającym tworzywo w kierunku obwodowym (Geometria_3) uzyskano takie same wyniki, jak w przypadku wykorzystania elementu standardowego (Geometria_S).

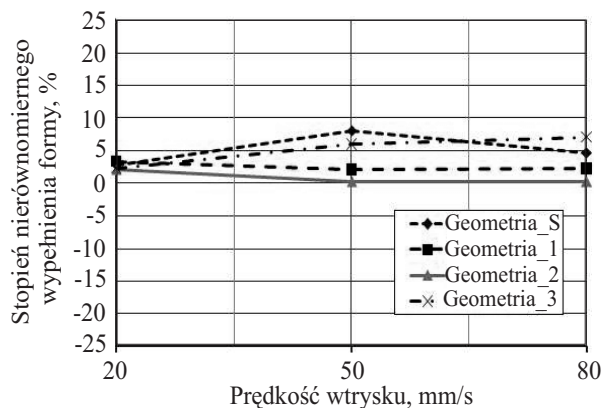
Na rys. 14, 15 przedstawiono wyniki wtryskiwania poli(tereftalanu butylenu). Rysunek 14 pokazuje próbki uzyskane z zastosowaniem różnych rozwiązań układu wlewowego, a rys. 15 ilustruje zależność stopnia nierównomierności wypełnienia formy od prędkości wtrysku i natężenia przepływu. W przypadku rozwiązania standardowego (Geometria_S) szybciej wypełniają się gniazda wewnętrzne ($I_m > 0$), a stopień nierównomierności wypełnienia zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu tworzywa, przy czym nierównomierność wypełnienia jest większa niż w przypadku wtryskiwania polistyrenu (PS-HI) i silniej zależy od natężenia przepływu tworzywa. Ta obserwacja jest zgodna z wynikami badań symulacyjnych, chociaż wspomniana zależność jest wyraźnie słabsza w zakresie małej prędkości wtrysku. W układach z korektą geometryczną kanałów (Geometria_1, Geometria_2) szybciej wypełniają się gniazda zewnętrzne ($I_m < 0$), a nierównomierność wypełnienia również jest większa, niż w przypadku wtryskiwania PS-HI. Obserwowana zmiana sposobu wypełniania gniazd jest zgodna z wynikami symulacji w zakresie większej szybkości ścinania. W zakresie małej szybkości ścinania symulacja wskazuje na przepływ zrównoważony. Układ z elementem rozprowadzającym tworzywo w kierunku obwodowym (Geometria_3) działa podobnie jak układ standardowy (Geometria_S).



Rys. 16. Próbkki polietylenu małej gęstości (PE-LD) uzyskane z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych układu wlewowego: a) Geometria_S, b) Geometria_1, c) Geometria_2, d) Geometria_3

Fig. 16. Low density polyethylene (PE-LD) moldings obtained by using different runner layouts: a) Geometry_S, b) Geometry_1, c) Geometry_2, d) Geometry_3

Na rys. 16, 17 przedstawiono wyniki wtryskiwania polietylenu małej gęstości (PE-LD). Na rysunku 16 pokazano próbki otrzymane z zastosowaniem różnych rozwiązań układu wlewowego, natomiast rys. 17 przedstawia zależność stopnia nierównomierności wypełnienia formy od prędkości wtrysku i natężenia przepływu. Wyniki są odmienne niż uzyskane w poprzednich przypadkach. Nierównomierność wypełnienia jest nieduża i w małym stopniu zależy od natężenia przepływu tworzywa. Nie obserwuje się też wpływu rozwiązania konstrukcyjnego układu wlewowego na nierównomierność wypełnienia formy.



Rys. 17. Stopień nierównomierności wypełnienia formy podczas wtryskiwania polietylenu małej gęstości (PE-LD)

Fig. 17. Degree of mold filling imbalance during the injection of low density polyethylene (PE-LD)

PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania symulacyjno-doświadczalne dotyczące nierównomiernego wypełniania form wtryskowych zrównoważonych geometrycznie, w odniesieniu do tworzyw amorficznych i częściowo krystalicznych, z zastosowaniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych kanałów doprowadzających.

Stwierdzono, że sposób wypełniania formy zależy od wzajemnych relacji parametrów charakteryzujących przepływ tworzywa w kanałach doprowadzających układu wlewowego formy, a więc od rozkładu prędkości przepływu tworzywa, szybkości ścinania oraz temperatury i lepkości tworzywa. Relacje te zależą z kolei od natężenia przepływu i warunków chłodzenia oraz od właściwości reologicznych i termodynamicznych wtryskiwanego tworzywa, np. zależności lepkości od szybkości ścinania i temperatury, a także od dyfuzyjności cieplnej i współczynnika przejmowania ciepła.

Wykonane w pracy symulacje wymagały zastosowania siatki utworzonej z ok. miliona elementów czworosiecznych. W celu dokładniejszego rozpoznania zjawiska należy rozszerzyć zakres symulacji na przepływ tworzywa w dyszy wtryskowej, gdzie jest kształtowany profil płynięcia tworzywa.

W wyniku przeprowadzonych badań nie potwierdzono uniwersalności metod geometrycznej korekcji kanałów (Geometria_1, Geometria_2) w odniesieniu do różnych tworzyw i różnych warunków przetwórstwa. W przypadku układu z elementem rozpraszającym tworzywo w kierunku obwodowym (Geometria_3) nie zauważono jego wpływu na sposób wypełniania formy.

Ponieważ trudno jest jednoznacznie sformułować zasady konstrukcji układów wlewowych wielogniazdowych form wtryskowych, a proponowane dotąd rozwiązania nie są uniwersalne, każdy przypadek takiego układu należy rozpatrywać indywidualnie, z zastosowaniem odpowiednich symulacji komputerowych. Wobec niedoskonałości stosowanych dotąd rozwiązań proponuje się rozwiązania optymalizujące geometrię układu wlewowego na podstawie wydajnej i efektywnej metody algorytmów genetycznych (AG opartych na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczności), którą autorzy tego artykułu wykorzystywali do optymalizacji procesu wytłaczania jednoślismakowego [30], a Fernandes [19] — do optymalizacji układu chłodzenia formy wtryskowej.

Algorytmy genetyczne (AG) opierają się na mechanizmach doboru naturalnego oraz dziedziczności. W porównaniu z innymi metodami optymalizacyjnymi charakteryzują się następującymi cechami:

- parametry zadania są tu przetwarzane nie bezpośrednio, lecz w postaci zakodowanej;
- poszukiwania rozwiązania są prowadzone nie z jednego punktu, ale z pewnej ich populacji, co powoduje, że prawdopodobieństwo utknięcia w ekstremum lokalnym jest mniejsze;

- stosowane są probabilistyczne, a nie deterministyczne reguły wyboru;

- przeszłe doświadczenia są wykorzystywane do określenia nowego obszaru poszukiwań o spodziewanej wyższej jakości, dzięki czemu, pomimo elementu losowości, nie sprowadzają się do przypadkowego błędzenia;

- korzysta się tylko z funkcji celu, a nie z jej pochodnych lub innych pomocniczych informacji.

Autorzy składają podziękowania firmie HASCO Hasenderen GmbH + CokG za pomoc w uzyskaniu elementów znormalizowanych do wykonania formy wtryskowej wykorzystywanej w badaniach.

LITERATURA

- [1] Beaumont J.P.: „Runner and Gating Design Handbook”, Hanser, Munich 2004.
- [2] Beaumont J.P., Young J.H.: *Journal of Injection Molding Technology* **1997**, 1, 133.
- [3] Beaumont J.P., Young J.H., Jaworski M.J.: *Journal of Injection Molding Technology* **1998**, 2, 599.
- [4] Reifschneider L.G.: *Journal of Injection Molding Technology* **2001**, 5, 208.
- [5] Haylett J.R., Rhoades D.W.: *Proceedings of ANTEC* **2001**, 47, 3136.
- [6] Frenkler D.: *Mechanik* **2005**, 78, 1033.
- [7] Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
- [8] White Ch.W.: *Proceedings of ANTEC* **1999**, 45, 3672.
- [9] www.autodesk.com
- [10] www.moldex3d.com
- [11] Cook P.S., Yu H., Kietzmann C.V., Costa F.S.: *Proceedings of ANTEC* **2005**, 51, 526.
- [12] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *Mechanik* **2008**, 81, 327.
- [13] Chien C.C., Chiang C.C., Yang W.H., Tsai V., Hsu D.C.: *Proceedings of ANTEC* **2005**, 51, 55.
- [14] Chien J.C., Huang Ch.T., Yang W.H., Tsai V., Hsu D.C.: *Proceedings of ANTEC* **2006**, 52, 1153.
- [15] Hsu Ch.L., Lin Y.Z., Chen S.Ch., Tsai Ch.H., Chang Ch.Y., Yang W.H.: *Proceedings of ANTEC* **2008**, 54, 379.
- [16] Lopez I.D., Bednar A., Osswald T.A.: *Proceedings of ANTEC* **2010**, 56, 1323.
- [17] Huang T.C., Huang P.H., Yang S.Y., Ko T.Y.: *International Polymer Processing* **2008**, 23, 363.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2075>
- [18] Petzold F., Thornagel M.: *Proceedings of ANTEC* **2009**, 55, 291.
- [19] Fernandes C., Pontes A.J., Viana J.C., Gaspar-Cunha A.: *International Polymer Processing* **2012**, 27, 213.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2511>
- [20] Rhee B.O., Park H.P., Cha B.S., Lee K.: *Proceedings of ANTEC* **2006**, 52, 1113.
- [21] Rhee B.O., Lee E.J., Lee Y.J., Park H.P., Cha B.S.: *Proceedings of ANTEC* **2009**, 55, 2078.

- [22] Schwenk T.L.: Proceedings of ANTEC 2009, 55, 2547.
[23] Gadley J., Grumski J.: Proceedings of ANTEC 2011, 57, 360.
[24] Bociąga E., Jaruga T.: *Polimery* 2006, 51, 843.
[25] Skiba T., Toomey N.: Proceedings of ANTEC 2008, 54, 955.
[26] Glotzbach M., Haws Ch.: Proceedings of ANTEC 2010, 56, 1382.
[27] Slye K., Coulter J., Bekisli B. i in.: Proceedings of ANTEC 2011, 57, 1529.
[28] Bociąga E., Jaruga T.: *Polimery* 2009, 54, 654.
[29] Zięba S., Wilczyński K.J.: *Mechanik* 2008, 81, 286.
[30] Wilczyński K., Nastaj A.: Proceedings of IMECE 2006, 13 074, 683. <http://dx.doi.org/10.1115/IMECE2006-13074>

Otrzymano 22 V 2014 r.

Wydział Chemiczny, Zakład Inżynierii i Technologii Polimerów
Politechniki Wrocławskiej oraz Fundacja Rozwoju Politechniki Wrocławskiej
zapraszają do udziału w

XXII KONFERENCJI NAUKOWEJ
MODYFIKACJA POLIMERÓW

Kudowa-Zdrój, 21 – 23 września 2015 r.

Patronat Honorowy:

JM Rektor Politechniki Wrocławskiej – prof. dr hab. inż. Tadeusz WIĘCKOWSKI
Dziekan Wydziału Chemicznego PWr – prof. dr hab. inż. Andrzej TROCHIMCZUK
Zarząd Oddziału Wrocławskiego SITPChem

Przewodniczący Komitetu Naukowego: prof. dr hab. inż. Ryszard STELLER

Wiceprzewodniczący Komitetu Naukowego: prof. dr hab. inż. Jacek PIGŁOWSKI

Tematyka konferencji:

- Modyfikacja chemiczna i reaktywne przetwarzanie polimerów
- Modyfikacja fizyczna i kompozyty/nanokompozyty polimerowe
- Specjalne układy polimerowe
- Tworzywa polimerowe z surowców odnawialnych i wtórnych
- Nowe zastosowania oraz metody badań i właściwości polimerów

Program naukowy konferencji: referaty plenarne i sekcyjne oraz sesje plakatowe.

Zgłoszenia prosimy przesyłać na adres Sekretarza: grazyna.kedziora@pwr.edu.pl

Opłata konferencyjna do 15 lipca 2015 r.: 1540 zł (pok. 1 os.), 1330 zł (pok. 2 os.), 1140 zł (tylko dla doktorantów w pok. 2 os.)

Opłata obejmuje: zakwaterowanie, wyżywienie, materiały konferencyjne i imprezy towarzyszące

Termin nadsyłania prac – 26 czerwca 2015 r.

Informacje dotyczące przygotowania tekstu na www.oficyna.pwr.edu.pl w zakładce Menu –
Informacje dla autorów

Miejsce konferencji: Hotel Verde Montana 4* Wellness & Spa

Informacje: Grażyna Kędziora, tel. 071-320-33-21, grazyna.kedziora@pwr.edu.pl; Ryszard Steller, tel. 071-320-26-60, ryszard.steller@pwr.edu.pl; adres: Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław z dopiskiem „Modyfikacja Polimerów”