

Modelowanie procesu wytłaczania jednoślímakowego z dozowanym zasilaniem mieszanin tworzyw termoplastycznych

Krzysztof J. Wilczyński^{1), *)}, Andrzej Nastaj¹⁾

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.199](https://doi.org/10.14314/polimery.2015.199)

Streszczenie: Przeprowadzono symulacje procesu wytłaczania z dozowaniem mieszaniny polietylenu małej gęstości z polistyrenem (PE-LD/PS). Na podstawie modelu komputerowego procesu wykonano obliczenia symulacyjne uplastycznienia tworzywa, rozkładu ciśnienia i temperatury tworzywa oraz stopnia wypełnienia ślimaka. Obliczenia zweryfikowano doświadczalnie.

Słowa kluczowe: wytłaczanie jednoślímakowe z dozowanym zasilaniem, model komputerowy, symulacja, weryfikacja doświadczalna.

Modeling of starve-fed single-screw extrusion of thermoplastic polyblends

Abstract: Modeling of single-screw extrusion process of polymer blends with starve feeding of extruder has been described. Simulations of starve-fed single screw extrusion of low density polyethylene (PE-LD) – polystyrene (PS) polyblend have been performed. Using the computer model of the process, the simulation calculations for polymer plasticization, distribution of pressure and temperature as well as extent of screw filling have been carried out and validated experimentally.

Keywords: single-screw extrusion with starve feeding, computer model, simulation, experimental verification.

Wytłaczanie tworzyw można realizować stosując zasilanie grawitacyjne lub zasilanie z dozowaniem. Wytłaczarki jednoślímakowe są zwykle zasilane grawitacyjnie, natomiast wytłaczarki dwuślímakowe – z dozowaniem.

W procesie jednoślímakowym, w warunkach grawitacyjnego zasilania wytłaczarki, ślimak pobiera tworzywo z zasobnika bez ograniczeń, jest więc całkowicie wypełniony tworzywem. W strefie zasilania jest generowane ciśnienie, powodujące zagęszczanie materiału i tworzenie jednolitej, ciągłej warstwy stałej. Tworzywo uplastycznia się powoli i jest słabo wymieszane. W przypadku takiego sposobu zasilania wydajność wytłaczania zależy głównie od prędkości obrotowej ślimaka.

W procesie dwuślímakowym, w warunkach zasilania z dozowaniem, w początkowej strefie wytłaczarki ślimaki nie są całkowicie wypełnione tworzywem. Nie generuje się więc ciśnienie i nie powstaje ciągła warstwa stała. Cząstki tworzywa zachowują swoją odrębność podczas uplastycznienia i tworzą zawieszinę w uplastycznym tworzywie. Sprzyja to szybszemu uplastycznieniu i dobremu wymieszanemu tworzywa. Wydajność wytłaczania

z dozowanym zasilaniem nie zależy od prędkości obrotowej ślimaka, lecz od wydajności urządzenia dozującego.

Korzyści z zasilania z dozowaniem tworzywa, obserwowane podczas wytłaczania dwuślímakowego, czyli warunki do szybkiego uplastycznienia i wymieszania tworzywa, skłaniają do zastosowania tego typu zasilania w procesie wytłaczania jednoślímakowego. Jest to szczególnie obiecujące w przypadku wytłaczania tworzyw zaawansowanych technologicznie, mieszanin polimerów lub kompozytów polimerowych.

Właściwości mieszanin polimerowych określa ich budowa morfologiczna, zależna od termodynamicznych i reologicznych właściwości składników, a także od termomechanicznej historii ich przetwórstwa. Budowę morfologiczną warunkuje skład mieszaniny, stosunek lepkości i sprężystości jej składników, napięcie powierzchniowe i sposób przetwarzania [1, 2].

Zagadnienie kształtowania się morfologii mieszanin polimerowych w procesie wytłaczania było przedmiotem licznych prac doświadczalnych, natomiast badania teoretyczne były nieliczne. Utracki i Shi [3] pierwsi zaproponowali model kształtowania się morfologii w warunkach przepływu dwuślímakowego współbieżnego, rozwinięty następnie przez Huneault [4], który dokonał bardziej zaawansowanej analizy pola przepływu materiału. Delamare i Vergnes [5] opracowali model rozwoju

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

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: wilczyński_k@wp.pl

morfologii mieszanin w wylaczarce wspólnie, z wykorzystaniem programu komputerowego LUDOVIC do zdefiniowania termomechanicznych warunków przepływu tworzywa. Potente i Bastian [6] zastosowali do tego celu program SIGMA. Lee i White [7] jako pierwsi przedstawili model uplastycznienia materiału dwufazowego w wylaczarce wspólnie. Potente [8] opracował a następnie wprowadził do programu SIGMA model uplastycznienia mieszaniny. Brakuje publikacji dotyczących modelowania rozwoju morfologii w procesie wylaczania przeciwbieznego, poniewaz dopiero niedawno powstaly pierwsze modele tego procesu, np. [9–12].

Modelowanie morfologii w procesie wylaczania jednošlimakowego jest stosunkowo słabo rozwinięte. Wilczyński [13] pierwszy zaproponował model kształtowania się morfologii w wylaczarce jednošlimakowej, uwzględniający zjawiska fibrylacji i rozpadu włókien, a także deformacji kropli i jej rozpadu w obszarze tworzywa uplastycznionego, wyznaczonym za pomocą programu SSEM [14]. Domingues [15] przedstawił niedawno najbardziej zaawansowany model, obejmujący rozwój morfologii od początku stapiania tworzywa do wylotu cylindra wylaczarki. Badania w tym zakresie podsumowali ostatnio Ariffin i Ahmad [16].

Kształtowanie się morfologii mieszanin podczas wylaczania okrešlają termomechaniczne warunki przepływu definiujące: lokalne pole naprężeń, prędkość przepływu, szybkość ścinania oraz temperaturę i czas rezydencji tworzywa, dlatego podstawą analizy rozwoju morfologii jest termomechaniczny model przepływu materiału w procesie przetwórczym. Do takiego modelu można implementować mikroreologiczne modele morfologii, co pozwala na uzyskanie modelu rozwoju morfologii w całym procesie przetwórczym.

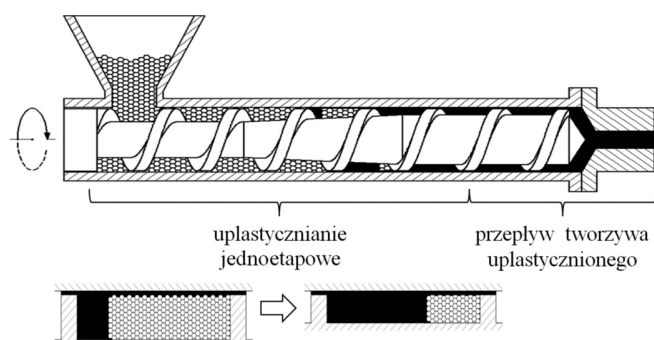
Pierwszy model przepływu tworzywa w wylaczarce jednošlimakowej zaproponował Carley'a [17], natomiast pierwsze badania uplastycznienia tworzywa wykonali Maddock [18] i Street [19], którzy zastosowali technikę „zimnego eksperymentu”, polegającą na szybkim ochłodzeniu wylaczarki, wyjęciu ślimaka z wylaczarki i zdjęciu wstęgi tworzywa ze ślimaka. Odpowiednie przekroje tej wstęgi umożliwiły rozpoznanie mechanizmu uplastycznienia tworzywa. Zauważono, że między tworzywem a cylindrem tworzy się warstewka tworzywa uplastycznionego, zgarniana w stronę aktywnego zwoju ślimaka. W miarę postępu uplastycznienia, wysokość warstwy stałej tworzywa się nie zmienia, natomiast zmniejsza się jej szerokość. Tadmor [20, 21] opracował model matematyczny uplastycznienia, a następnie zbudował pierwszy model całego procesu [22]. Agur i Vlachopoulos [23] przedstawili całkowity model wylaczania, uwzględniający przepływ tworzywa w głowicy wylaczarskiej, i na tej podstawie stworzyli program NEXTRUCAD. Vincelette [24] wykonał obliczenia symulacyjne procesu z zastosowaniem nienewtonowskiego modelu *power-law*. Potente [25] opracował dobrze zweryfikowany doświadczalnie program REX, Wilczyński [26] natomiast model

ogólny, a na jego podstawie program SSEM, umożliwiając symulację pracy wylaczarki i głowicy w różnej konfiguracji geometrycznej ślimaków i głowic. Prace w zakresie modelowania procesu jednošlimakowego podsumował ostatnio Alimkaynak [27].

Publikacji dotyczących badań wylaczania jednošlimakowego z dozowaniem jest niewiele i ograniczają się do procesu przetwarzania „czystych” tworzyw termoplastycznych, analizy ich uplastycznienia oraz mieszania w wylaczarce, bez próby modelowania procesu. Nichols i Kruder [28] pierwsi rozważyli – alternatywne w stosunku do tradycyjnego – zasilanie z ograniczeniem ilości doprowadzanego do wylaczarki tworzywa. McKelvey [29] analizował możliwe efekty ekonomiczne, wynikające ze zmniejszonego zużycia energii. Lopez-Lattore i McKelvey [30] podjęli jakościową dyskusję nad uplastycznieniem tworzywa i generacją ciśnienia. Isherwood [31] zaobserwował, że uplastycznienie polipropylenu w warunkach dozowanego zasilania rozpoczyna się z opóźnieniem, ale przebiega szybciej, dzięki czemu jest porównywalne z uplastycznieniem w wylaczaniu klasycznym. Gale [32] wykazał zwiększenie efektywności mieszania w przypadku dozowanego zasilania. Obszerłą analizę wylaczania z dozowaniem przedstawił Thompson [33], który badał proces uplastycznienia na podstawie pomiaru ciśnienia i temperatury tworzywa w wylaczarce. Stwierdził zwiększenie efektywności mieszania w miarę wzrostu stopnia dozowania tworzywa. Próbę modelowania wylaczania jednošlimakowego z dozowaniem podjął jedynie Strand [34], który zmodyfikował równania transportu tworzywa w stanie stałym, znane z modelu wylaczania tradycyjnego. Nie odniósł się jednak do uplastycznienia tworzywa i mechanizmu zapełniania kanału ślimaka wylaczarki.

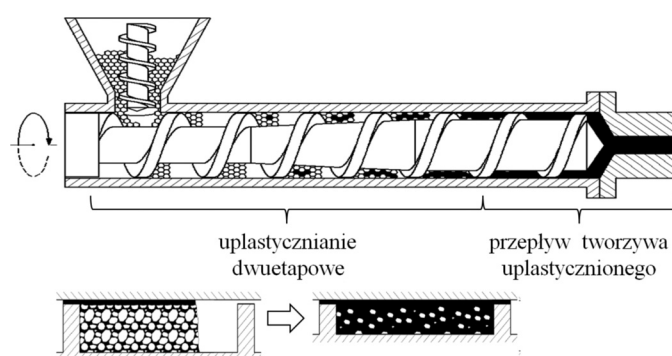
Na podstawie badań doświadczalnych, ujmujących uplastycznienie tworzywa i zapełnianie ślimaka wylaczarki, Wilczyński [35, 36] zaproponował ostatnio nowy mechanizm uplastycznienia tworzywa w wylaczarce zasilanej w sposób dozowany, z wyróżnieniem uplastycznienia wskutek przewodzenia ciepła w strefie ślimaka niezapełnionego oraz uplastycznienia dyspersyjnego w strefie ślimaka zapełnionego. Na tej podstawie opracowano pierwszy ogólny model wylaczania jednošlimakowego z dozowaniem [37].

Rysunek 1 przedstawia wylaczanie z tradycyjnym zasilaniem, gdy ślimak jest całkowicie zapełniony tworzywem, a uplastycznienie przebiega zgodnie ze znanym mechanizmem Tadmora. Rysunek 2 natomiast przedstawia wylaczanie z zasilaniem dozowanym, w przypadku którego ślimak nie jest całkowicie zapełniony tworzywem, a uplastycznienie przebiega według mechanizmu dwuetapowego. W obszarze ślimaka niezapełnionego granulaty gromadzi się przy aktywnej ścianie zwoju ślimaka i stapia się w wyniku przewodzenia ciepła, a w obszarze całkowitego zapełnienia ślimaka nieuplastycznione cząstki tworzywa tworzą zawieszinę w tworzywie uprzednio uplastycznionym, uplastyczniając się pod



Rys. 1. Schemat wytłaczania tradycyjnego, z uplastycznianiem przebiegającym zgodnie z mechanizmem Tadmora

Fig. 1. Schematic of flood fed extrusion with a Tadmor melting mechanism



Rys. 2. Schemat wytłaczania z dozowaniem, w którym uplastycznianie przebiega zgodnie z nowym, dwuetapowym mechanizmem uplastyczniania

Fig. 2. Schematic of starve-fed extrusion process with a new two-stage melting mechanism

wpływem ciepła powstającego w wyniku rozpraszania energii.

Upłastycznianie i przepływ mieszanin polimerów w warunkach wytłaczania jednoślیمakowego z dozowaniem nie były jak dotychczas dyskutowane w literaturze. Brakuje więc podstaw teoretycznych do modelowania rozwoju morfologii mieszanin w takim procesie.

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wytłaczania z dozowaniem mieszaniny polietylenu małej gęstości i polistyrenu PE-LD/PS, wykonane na podstawie komputerowego modelu tego procesu, odpowiednio zmodyfikowanego na potrzeby symulacji wytłaczania mieszanin. Wyniki tych symulacji zweryfikowano doświadczalnie.

MODELOWANIE PROCESU

Podstawę modelowania wytłaczania stanowi analiza mechanizmu uplastyczniania i przepływu tworzywa oraz opracowanie modeli matematycznych opisujących te zjawiska. Połączenie takich elementarnych modeli prowadzi do powstania modelu ogólnego, opisującego przepływ tworzywa w całym procesie przetwórczym.

W wytłaczaniu bez dozowania natężenie przepływu tworzywa nie jest ustalane przez operatora wytłaczarki, lecz wynika ze współdziałania układu wytłaczarka-głowica, którego warunki określa punkt pracy wytłaczarki, determinujący wydajność wytłaczania (natężenie przepływu tworzywa), i ciśnienie wytłaczanego tworzywa. Podstawę algorytmu obliczeń stanowi rozwiązanie problemu wyznaczania natężenia przepływu oraz rozkładu ciśnienia tworzywa w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i głowicy. Problem ten można rozwiązać tylko z zastosowaniem procedury obliczeń iteracyjnych, w której jest badana zgodność przyrostu ciśnienia w układzie uplastyczniającym wytłaczarki ze spadkiem ciśnienia w głowicy.

W procesie wytłaczania z dozowaniem operator wytłaczarki ustala natężenie przepływu tworzywa, nie ma więc potrzeby stosowania iteracyjnej procedury poszukiwania punktu pracy wytłaczarki. Nie można jednak prowadzić obliczeń dotyczących strefy od zasobnika w kierunku głowicy, gdyż w początkowej części wytłaczarki nie jest generowane ciśnienie, nie są więc też znane warunki przepływu. Decydujące znaczenie ma tutaj określenie miejsca zapełnienia się ślimaka tworzywem, wyznaczanego w procedurze iteracyjnej.

Ze względu na potrzeby modelowania proces wytłaczania z dozowaniem można traktować jako szeregowe połączenie elementarnych przestrzeni przepływu, w których natężenie przepływu jest znane i przybiera stałą wartość.

$$G' = G_1 = G_2 = \dots = G_{i-1} = G_i = G_n \quad (1)$$

gdzie: G — masowe natężenie przepływu tworzywa (wydajność wytłaczania), G_1, G_2 — natężenie przepływu w pierwszym i drugim elemencie, G_i — natężenie przepływu w i -tym elemencie, n — numer kolejny elementu.

Wartości parametrów definiujących przebieg procesu, np. ciśnienia i temperatury, na końcu każdej elementarnej przestrzeni przepływu są równe wartościom tych parametrów na początku następnego elementu, np.

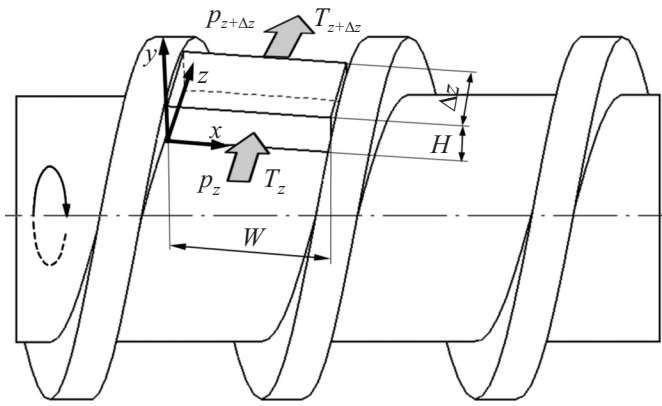
$$p_{i_out}(z) = p_{i+1_in}(z + \Delta z) \quad (2)$$

$$T_{i_out}(z) = T_{i+1_in}(z + \Delta z) \quad (3)$$

gdzie: p_{i_out} — ciśnienie na końcu i -tego elementu, p_{i+1_in} — ciśnienie na początku $i+1$ elementu, T_{i_out} — temperatura na końcu i -tego elementu, T_{i+1_in} — temperatura na początku $i+1$ elementu, z — położenie elementu wzdłuż długości kanału, Δz — długość elementu.

Ten schemat obliczeń przedstawiono na rys. 3.

Podstawę modelu procesu stanowi niedawno opracowany dwuetapowy model uplastyczniania tworzywa [35]. Zgodnie z tym modelem dokonano bilansu mocy w elementarnej przestrzeni przepływu tworzywa w obszarze niecałkowitego wypełnienia ślimaka i uzyskano zależności definiujące przyrost temperatury tworzywa. W tym obszarze nie jest generowane ani ciśnienie, ani ciepło tarcia. Nagrzewanie tworzywa następuje w wyniku przewodzenia ciepła. W obszarze całkowitego wypełnie-



Rys. 3. Schemat obliczeniowy modelu: p_z, T_z – wartości wejściowe (dane do obliczeń), $p_z + \Delta z, T_z + \Delta z$ – wartości wyjściowe (wyniki obliczeń), p – ciśnienie, T – temperatura, W – szerokość kanału ślimaka, H – wysokość kanału ślimaka, Δz – długość elementarnego odcinka analizy

Fig. 3. Computation scheme: p_z, T_z – input data, $p_z + \Delta z, T_z + \Delta z$ – output data, p – pressure, T – temperature, W – screw channel width, H – screw channel height, Δz – computation increment

nia ślimaka nieuplastycznione cząstki tworzywa tworzą zawieszinę w tworzywie uplastycznionym. Uplastycznianie zachodzi w wyniku stapania tych cząstek pod wpływem ciepła generowanego w wyniku rozpraszania energii oraz pod wpływem ciepła dostarczanego przez grzejniki. Model uplastyczniania ma charakter dyspersyjny, a podstawą tego modelu jest bilans mocy na powierzchni nieuplastycznionych cząstek tworzywa.

Na podstawie modelu uplastyczniania i przepływu tworzywa uplastycznionego opracowano komputerowy model o parametrach skupionych, definiujący proces wyłaczania jednoślakowego z dozowanym zasilaniem i, z powodzeniem, zastosowano go do symulacji wyłaczania homopolimerów termoplastycznych [36].

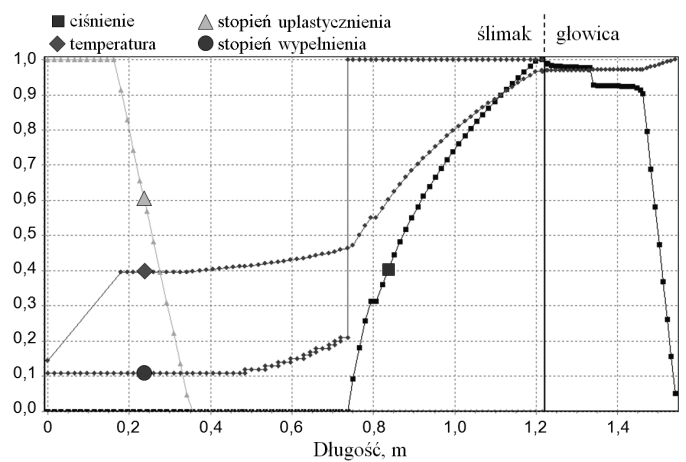
Modelowanie wyłaczania mieszanin wymaga odpowiedniego zdefiniowania ich właściwości, zwykle niedostępnych w literaturze. Dlatego też odpowiednio zmodyfikowano algorytm obliczeń modelu komputerowego procesu. Parametry materiałowe mieszaniny wyznaczono według reguły mieszania, zgodnie z którą właściwości mieszaniny zależą od udziału objętościowego jej składników.

W przypadku gęstości ta reguła przyjmuje następującą postać

$$\rho_{PE-LD/PS} = \rho_{PE-LD}\phi_{PE-LD} + \rho_{PS}\phi_{PS} \quad (4)$$

gdzie: $\rho_{PE-LD/PS}$ – gęstość mieszaniny, ρ_{PE-LD} – gęstość polietylenu, ρ_{PS} – gęstość polistyrenu, ϕ_{PE-LD} – udział objętościowy polietylenu, $\phi_{PS} = 1 - \phi_{PE-LD}$ – udział objętościowy polistyrenu.

Model umożliwia symulację wyłaczania, polegającą na obliczaniu profilu uplastyczniania tworzywa w kierunku od zasobnika do głowicy („do przodu”) oraz profilu ciśnienia i stopnia wypełnienia ślimaka w kierunku od głowicy do zasobnika („do tyłu”). Profil temperatury



Rys. 4. Ogólna charakterystyka procesu wyłaczania
Fig. 4. Overall characteristics of the extrusion process

jest obliczany „do przodu” w strefie uplastyczniania, natomiast w strefie dozowania – „do tyłu”. Takie obliczenia umożliwiają lokalizację miejsca, w którym ślimak całkowicie wypełnia się tworzywem.

Przykład symulacji pokazano w formie bezwymiarowej na rys. 4, w postaci ogólnej charakterystyki procesu, obejmującej najważniejsze parametry wyłaczania: rozkład ciśnienia, rozkład temperatury, profil stopnia uplastyczniania tworzywa oraz profil stopnia wypełnienia ślimaka.

Stopień uplastyczniania tworzywa określa stosunek objętości tworzywa w stanie stałym do całkowitej objętości tworzywa w rozpatrywanej przestrzeni przepływu, natomiast stopień wypełnienia ślimaka definiuje stosunek objętości tworzywa w danej przestrzeni elementarnej do objętości tej przestrzeni. Stopień uplastyczniania równy jedności oznacza, że tworzywo w całej swojej objętości w przestrzeni elementarnej jest w stanie stałym, natomiast stopień uplastyczniania równy zero oznacza, że tworzywo jest całkowicie stopione. Wartości stopnia uplastyczniania z przedziału 0–1 wskazują na częściowe uplastycznienie tworzywa. Stopień wypełnienia ślimaka równy jedności oznacza, że kanał ślimaka jest całkowicie wypełniony tworzywem, natomiast stopień wypełnienia równy zero wskazuje, że kanał ślimaka jest pusty. Wartości stopnia wypełnienia ślimaka z przedziału 0–1 wskazują na częściowe wypełnienie ślimaka.

BADANIA SYMULACYJNO-DOŚWIADCZALNE

Program badań obejmował symulację i weryfikację doświadczalną wyłaczania mieszaniny polietylenu małej gęstości PE-LD z polistyrenem PS, o udziale masowym składników 85/15 (85 % PE-LD i 15 % PS).

Materiały

– PE-LD (firmy Basell Orlen, Purell 3020D): gęstość $\rho = 0,927 \text{ g/cm}^3$, wskaźnik szybkości płynięcia $MFR =$

0,3 g/10 min (190 °C, 2,16 kg), temperatura topnienia $T_m = 114$ °C;

– PS (firmy BASF Polystyrol 158 K): gęstość $\rho = 1,040$ g/cm³, wskaźnik szybkości płynięcia $MFR = 3,0$ g/10 min (200 °C, 5,00 kg), temperatura mięknięcia $T_g = 109$ °C.

Metodyka badań

Badania symulacyjno-doświadczalne wykonano w dwóch trybach zasilania:

– klasycznego zasilania grawitacyjnego, tzn. bez dozowania tworzywa;

– zasilania z dozowaniem tworzywa, na różnym poziomie dozowania.

Badania przeprowadzono przy użyciu wyciarki Metalchem T-45, wyposażonej w dozownik ślimakowy własnej konstrukcji. Zastosowano klasyczny ślimak trójstrefowy o średnicy $D = 45$ mm i długości $L/D = 27$ oraz stopniu sprężania $CR = 8/3$ (stosunek głębokości kanału ślimaka w strefie zasilania do głębokości kanału w strefie dozowania) oraz głowicę prostą do wytłaczania prętów o przekroju kołowym i średnicy $d = 5$ mm. Zastosowane tensometryczne czujniki ciśnienia umieszczono w cylindrze (w odległości 520 mm, 775 mm i 1030 mm od osi zasobnika) oraz w głowicy (w odległości 1228 mm od osi zasobnika).

Badania wykonano z zastosowaniem różnych prędkości obrotowych ślimaka: $N = 20$ obr/min, $N = 50$ obr/min i $N = 80$ obr/min. Ustalono następujące wartości temperatury cylindra i głowicy w kolejnych strefach wyciarki: $T_I = 170$ °C, $T_{II} = 180$ °C, $T_{III} = 180$ °C, $T_{IV} = 180$ °C, $T_G = 180$ °C.

Lepkość mieszaniny wyznaczono w zakresach szybkości ścinania i temperatury, odpowiadających warunkom przetwórstwa. Pomiaru dokonano przy użyciu reometru kapilarnego, działającego na zasadzie stałej szybkości ścinania. Szybkość ścinania korygowano poprawką Rabinowitscha, nie stosowano natomiast poprawki wlotowej Bagleya, gdyż w badaniach użyto kapilary o dużym stosunku długości do średnicy $L/D = 60$.

Właściwości reologiczne materiału, zależności naprężeń ścinających od szybkości ścinania $\tau' = f(\dot{\gamma})$ i zależności lepkości od szybkości ścinania i temperatury $\eta = f(\dot{\gamma}, T)$, opisano na podstawie potęgowego równania Ostwalda—de Waele

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

i logarytmicznego równania Kleina:

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_{11} \ln^2 \dot{\gamma} + A_{12} T \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_{22} T^2 \quad (6)$$

gdzie: τ — naprężenie styczne, $\dot{\gamma}$ — szybkość ścinania, m — stała konsystencji, n — wykładnik płynięcia, η — lepkość, T — temperatura; A_0 , A_1 , A_{11} , A_{12} , A_2 i A_{22} — parametry równania Kleina.

Na podstawie obliczeń aproksymacyjnych uzyskano następujące wartości parametrów równania Kleina: $A_0 =$

14,49132073, $A_1 = -0,812149514$, $A_{11} = -0,010400416$, $A_{12} = 0,00157898$, $A_2 = -0,029769873$, $A_{22} = -0,0000289218$.

Pozostałe dane materiałowe zaczerpnięto z literatury.

WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki symulacji wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS w warunkach zasilania grawitacyjnego i dozowanego. Widać wyraźnie, że w procesie tradycyjnym jest generowane wyższe ciśnienie. Wraz ze wzrostem natężenia przepływu, rośnie też ciśnienie (rys. 5a), zwiększa się także długość całkowicie wypełnionego kanału ślimaka (rys. 5d). Ciśnienie nie jest generowane (jest równe zero) w obszarze niezapełnionego ślimaka (rys. 5a, 5d), gdzie stopień wypełnienia jest mniejszy od jedności. Widać również (rys. 5c), że w warunkach zasilania dozowanego, przy natężeniu przepływu 20 kg/h, tworzywo stapia się według pierwszego mechanizmu uplastyczniania, natomiast przy natężeniu 25 kg/h ujawnia się także drugi mechanizm. W przypadku wytłaczania z dozowaniem uplastycznianie zachodzi szybciej niż w wytłaczaniu tradycyjnym.

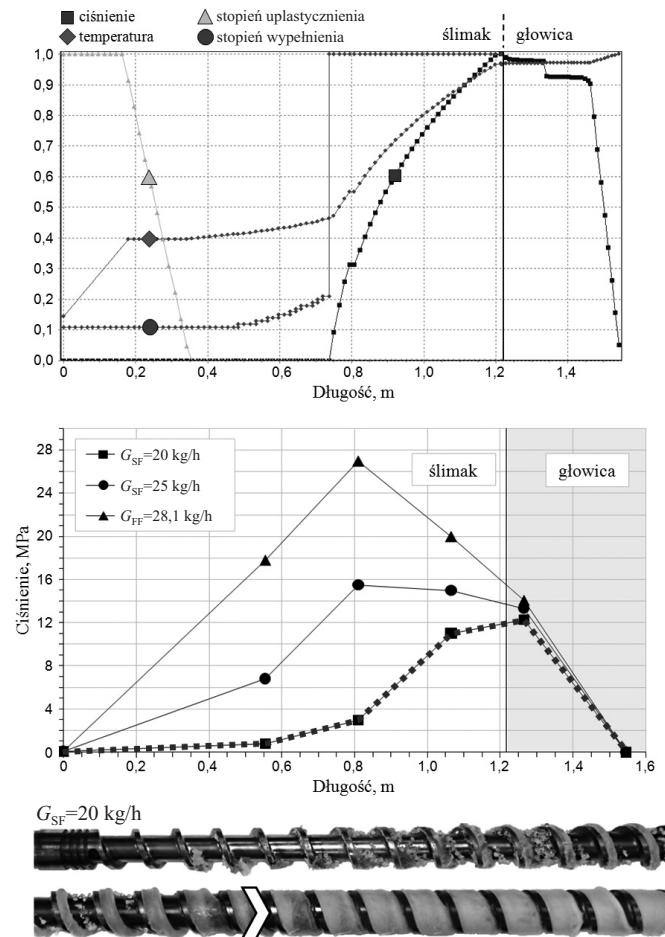
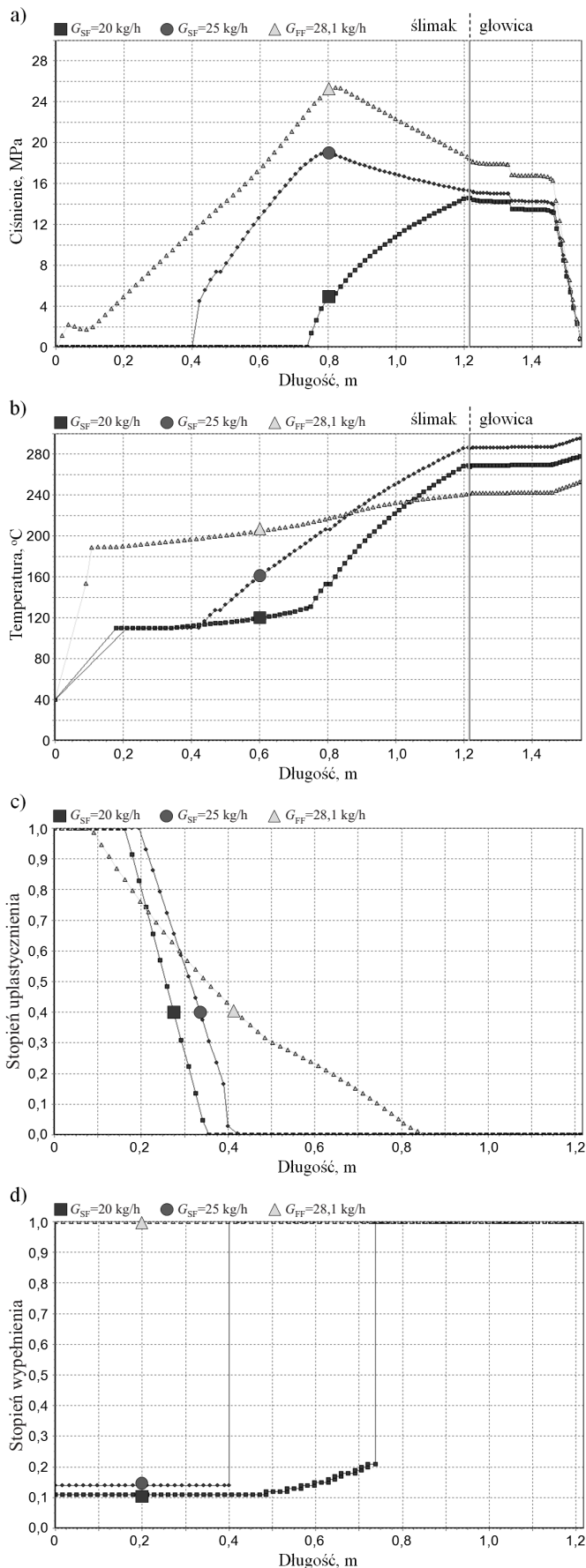
Wyniki weryfikacji doświadczalnej wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS przedstawiono na rys. 6—8. Oceniano wpływ masowego natężenia przepływu tworzywa na przebieg procesu prowadzonego z prędkością wytłaczania 80 obr/min. Wytłaczanie z dozowaniem realizowano z zastosowaniem dwóch wartości natężenia przepływu — 20 kg/h i 25 kg/h. W procesie wytłaczania tradycyjnego uzyskano wydajność 28,1 kg/h.

Stopień wypełnienia ślimaka weryfikowano na podstawie porównania długości odcinków kanału ślimaka całkowicie zapełnionego tworzywem. Początek obszaru całkowitego zapełnienia ślimaka jest zaznaczony strzałką. Na wykresie symulacji procesu ten punkt odpowiada stopniowi wypełnienia równemu jedności. Wyraźnie widać, że stopień wypełnienia ślimaka i długość strefy wypełnionej całkowicie zwiększają się ze wzrostem natężenia przepływu. Stopień wypełnienia ślimaka jest stosunkowo dobrze przewidywany, zwłaszcza w przypadku natężenia 20 kg/h. Wyniki symulacji w warunkach natężenia 25 kg/h były przeszacowane o ok. 20 %.

Postęp w uplastycznianiu oceniano na podstawie stopnia uplastyczniania, czyli udziału objętościowego tworzywa w stanie stałym w całej objętości tworzywa w analizowanym obszarze. Ponieważ trudno jest wyciąć próbki i uzyskać obraz ich przekroju poprzecznego w obszarze niecałkowitego wypełnienia ślimaka, ocenę przebiegu uplastyczniania ograniczono do długości kanału odpowiadającej obszarowi, w którym zachodzi uplastycznianie. W wyniku symulacji uplastyczniania uzyskano mniejszą zgodność z doświadczeniem niż w wyniku symulacji stopnia wypełnienia, w obu przypadkach obserwowano szybsze uplastycznianie w procesie wytłaczania z dozowaniem niż wytłaczania tradycyjnego.

W wytłaczaniu z dozowanym natężeniem przepływu 20 kg/h (rys. 6), materiał stapiał się zgodnie z pierwszym

mechanizmem uplastyczniania. Początkowo stopień uplastyczniania tworzywa ogrzewanego do temperatury

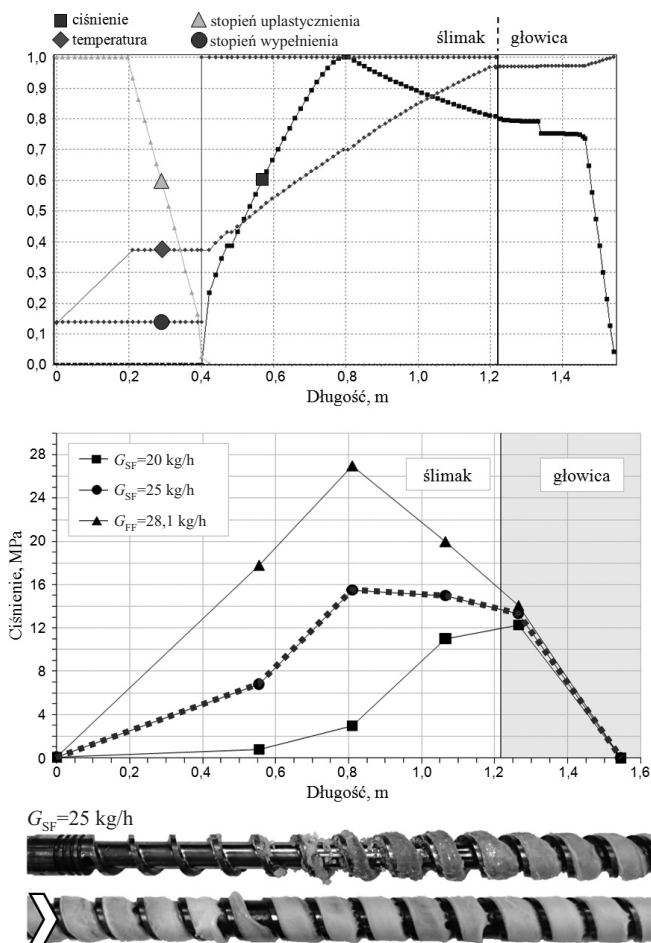


Rys. 6. Wyniki badań symulacyjno-doświadczalnych wytłaczania PE-LD/PS z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min i dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 20$ kg/h (strzałka wskazuje początek obszaru całkowitego zapełnienia ślimaka)

Fig. 6. Validation for extrusion of PE-LD/PS polyblend at the screw speed $N = 80$ rpm and feed rate $G_{SF} = 20$ kg/h (the arrow shows the beginning of the fully filled region)

topnienia był równy jedności. Po osiągnięciu temperatury topnienia, materiał się topił i stopień jego uplastycznienia zmniejszał się aż do zera – wartości odpowiadającej całkowitemu stopniowi. W tym przypadku uplastycznienie przebiegało stosunkowo szybko. Uzyskana w wyniku obliczeń symulacyjnych całkowita długość kanału ślimaka, niezbędna do uplastycznienia tworzywa, różniła się o ok. 25 % od wartości wyznaczonej doświadczalnie.

Rys. 5. Wyniki symulacji wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min, z zasilaniem dozowanym $G_{SF} = 20$ kg/h, $G_{SF} = 25$ kg/h oraz zasilaniem grawitacyjnym $G_{FF} = 28,1$ kg/h: a) ciśnienie, b) temperatura, c) stopień uplastycznienia tworzywa, d) stopień wypełnienia kanału ślimaka
Fig. 5. Simulation results for extrusion of PE-LD/PS polyblend at the screw speed $N = 80$ rpm, feed rates $G_{SF} = 20$ kg/h, $G_{SF} = 25$ kg/h and flood feeding $G_{FF} = 28,1$ kg/h: a) pressure, b) temperature, c) solid fraction, d) fill factor



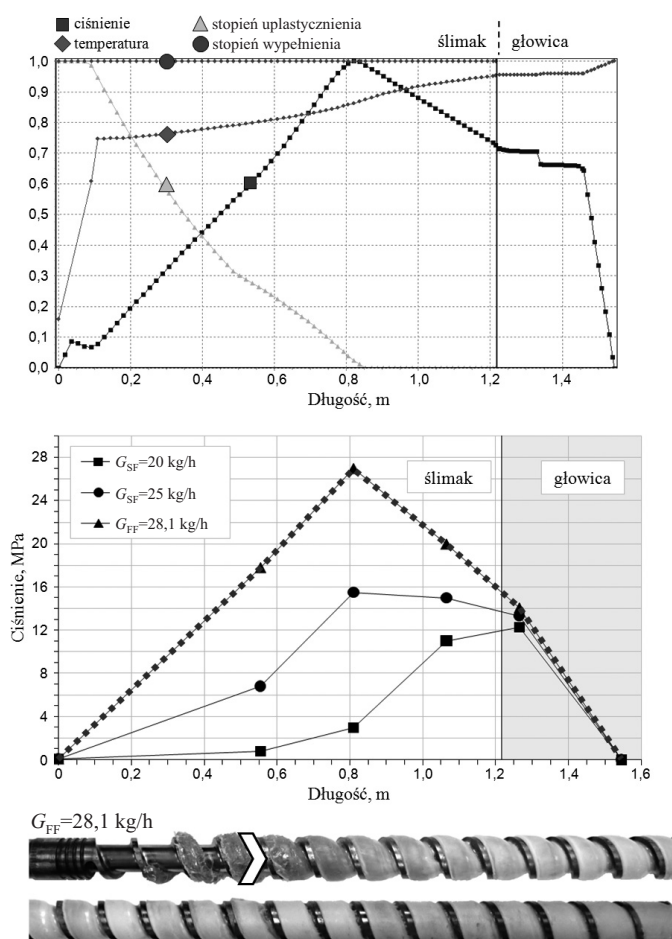
Rys. 7. Wyniki badań symulacyjno-doświadczalnych wytłaczania PE-LD/PS z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min i dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 25$ kg/h (strzałka wskazuje początek obszaru całkowitego zapelnienia ślimaka)

Fig. 7. Validation for extrusion of PE-LD/PS polyblend at the screw speed $N = 80$ rpm and feed rate $G_{SF} = 25$ kg/h (the arrow shows the beginning of the fully filled region)

W procesie wytłaczania z dozowanym natężeniem przepływu 25 kg/h (rys. 7) obserwowano obydwa mechanizmy uplastyczniania, przy czym drugi mechanizm – w końcowej fazie uplastyczniania. Początkowy odcinek odpowiadający stopniowi uplastycznienia równemu jedności był nieco dłuższy niż w poprzednio omawianym przypadku ($G_{SF} = 20$ kg/h), gdyż większe było natężenie przepływu tworzywa. Po osiągnięciu temperatury topnienia rozpoczynało się uplastycznianie, stopień uplastyczniania się zmniejszał, jednak, gdy kanał ślimaka został całkowicie wypełniony tworzywem, czyli, gdy stopień wypełnienia był równy jedności, ujawnił się drugi mechanizm uplastyczniania. I zgodnie z tym mechanizmem materiał uległ całkowitemu stopieniu, czyli stopień uplastyczniania zmniejszył się do zera. Punkt na krzywej odpowiadający końcowi uplastycznienia był w tym przypadku przesunięty nieco dalej nie uprzednio. Dokładność symulacji była lepsza niż poprzednio, wyniki różniły się o ok. 10 % od wartości uzyskanych doświad-

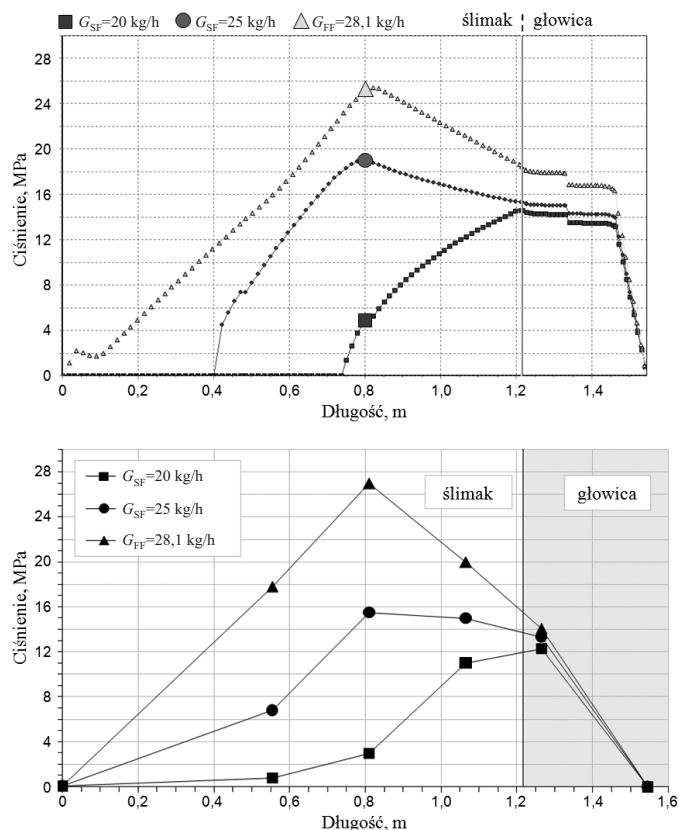
czalnie, a uplastycznianie przebiegało również stosunkowo szybko.

W procesie wytłaczania tradycyjnego, w którym uzyskano wydajność (natężenie przepływu) $28,1$ kg/h (rys. 8), przebieg uplastyczniania był całkowicie odmienny, ale zgodny z naszymi dotychczasowymi doświadczeniami. W tym przypadku stopień uplastycznienia jest definiowany stosunkiem szerokości warstwy stałej tworzywa (X) do szerokości kanału ślimaka (W) – wielkością określoną w teorii klasycznego wytłaczania jako $SBP = X/W$ (ang. *solid bed profile*). Uplastycznianie rozpoczyna się, gdy temperatura cylindra przewyższa temperaturę topnienia tworzywa, obserwuje się jednak pewne opóźnienie uplastyczniania (ang. *delay*), dopuszczone w modelu takiego procesu. W miarę postępu uplastyczniania stosunek szerokości warstwy stałej tworzywa do szerokości kanału ślimaka stopniowo zmniejsza się do zera, co następuje na końcu strefy sprężania.



Rys. 8. Wyniki badań symulacyjno-doświadczalnych wytłaczania PE-LD/PS z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min i zasilaniem grawitacyjnym $G_{FF} = 28,1$ kg/h (strzałka wskazuje początek obszaru całkowitego zapelnienia ślimaka)

Fig. 8. Validation for extrusion of PE-LD/PS polyblend at the screw speed $N = 80$ rpm and flood feeding $G_{FF} = 28.1$ kg/h (the arrow shows the beginning of the fully filled region)



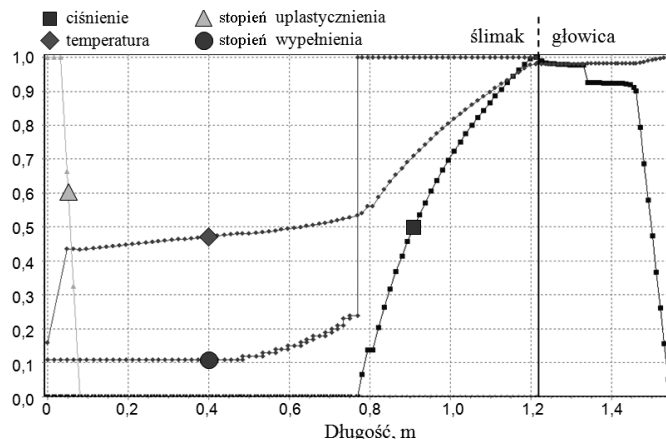
Rys. 9. Wyniki symulacji i pomiaru ciśnienia w procesie wytłaczania PE-LD/PS, z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min i dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 20$ kg/h, $G_{SF} = 25$ kg/h oraz zasilaniem grawitacyjnym $G_{FF} = 28,1$ kg/h: a) wyniki symulacji, b) wyniki pomiarów

Fig. 9. Validation for pressure computations for extrusion of PE-LD/PS polyblend at the screw speed $N = 80$ rpm, feed rates $G_{SF} = 20$ kg/h, $G_{SF} = 25$ kg/h and flood feeding $G_{FF} = 28.1$ kg/h: a) simulation, b) experimental

Weryfikację obliczeń rozkładu ciśnienia przedstawiono na rys. 9. Jak widać, ciśnienie było generowane jedynie w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka. Wartości ciśnienia dobrze przewidywane zarówno w procesie wytłaczania z dozowaniem, jak i wytłaczania tradycyjnego, w pobliżu głowicy były przeszacowane.

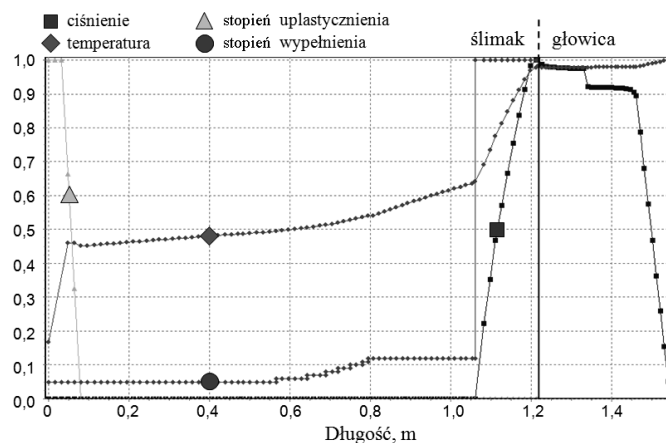
Ciśnienie – zerowe w obszarze niezapełnionego ślimaka – rośnie ze wzrostem natężenia przepływu. Najwyższe wartości ciśnienia uzyskuje się w procesie wytłaczania tradycyjnego. Niewielkie zmniejszenie natężenia przepływu (tj. ok. 10 %, z 28,1 kg/h – wytłaczanie tradycyjne do 25 kg/h – wytłaczanie z dozowaniem) powoduje zmniejszenie maksymalnego ciśnienia w cylindrze wytłaczarki, wg danych doświadczalnych, z 27 MPa do 16 MPa, czyli o ok. 40 %, a według danych symulacyjnych, z 26 MPa do 19 MPa, czyli o ok. 30 %. Taki spadek ciśnienia wpływa również na wyraźnie mniejsze zużycie energii.

Przeprowadzono także badania symulacyjne wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS w warunkach stałego natężenia przepływu 5 kg/h i zmiennej prędkości obrotowej



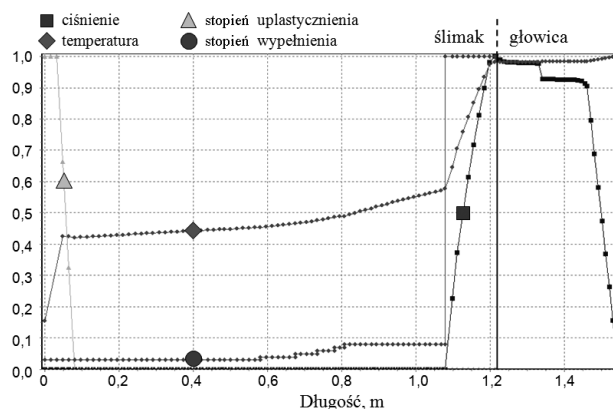
Rys. 10. Wyniki symulacji wytłaczania PE-LD/PS z dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 5$ kg/h i prędkością obrotową ślimaka $N = 20$ obr/min

Fig. 10. Simulation results for starve-fed extrusion of PE-LD/PS polyblend at the feed rate $G_{SF} = 5$ kg/h and screw speed $N = 20$ rpm



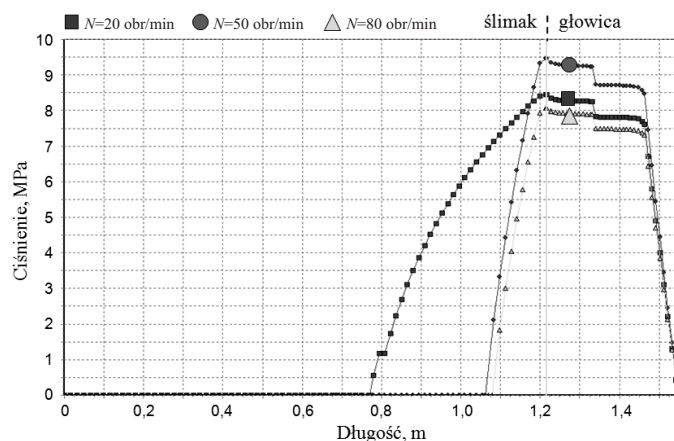
Rys. 11. Wyniki symulacji wytłaczania PE-LD/PS z dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 5$ kg/h i prędkością obrotową ślimaka $N = 50$ obr/min

Fig. 11. Simulation results for starve-fed extrusion of PE-LD/PS polyblend at the feed rate $G_{SF} = 5$ kg/h and screw speed $N = 50$ rpm



Rys. 12. Wyniki symulacji wytłaczania PE-LD/PS z dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 5$ kg/h i prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min

Fig. 12. Simulation results for starve-fed extrusion of PE-LD/PS polyblend at the feed rate $G_{SF} = 5$ kg/h and screw speed $N = 80$ rpm



Rys. 13. Wyniki obliczeń ciśnienia w procesie wytłaczania PE-LD/PS z dozowanym zasilaniem $G_{SF} = 5 \text{ kg/h}$ i prędkością obrotową ślimaka $N = 20 \text{ obr/min}$, $N = 50 \text{ obr/min}$, $N = 80 \text{ obr/min}$
 Fig. 13. Pressure computations for starve-fed extrusion of PE-LD/PS polyblend at the feed rate $G_{SF} = 5 \text{ kg/h}$ and screw speeds $N = 20 \text{ rpm}$, $N = 50 \text{ rpm}$, $N = 80 \text{ rpm}$

ślimaka 20 obr/min, 50 obr/min i 80 obr/min (rys. 10–12). Stopień wypełnienia oraz długość odcinka kanału ślimaka całkowicie wypełnionego tworzywem zmniejszają się ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka.

Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na profil ciśnienia nie jest jednoznaczny (rys. 13). Początkowo ciśnienie rośnie do wartości maksymalnej, odpowiadającej prędkości 50 obr/min, a następnie maleje. To nieoczekiwane zjawisko jest efektem silnej zależności lepkości od szybkości ścinania i temperatury.

PODSUMOWANIE

Badania symulacyjno-doświadczalne procesu wytłaczania z dozowaniem mieszanki PE-LD/PS wykonano na podstawie odpowiednio zmodyfikowanego modelu komputerowego procesu.

Ta pierwsza całościowa symulacja procesu wytłaczania jednoślindakowego mieszanin z dozowanym zasilaniem obejmowała m.in. rozkład ciśnienia i temperatury, przebieg uplastycznienia tworzywa oraz wypełnianie tworzywem ślimaka.

Wykazano, że przebieg uplastycznienia mieszanki PE-LD/PS w procesie wytłaczania z dozowaniem jest całkowicie odmienny niż w procesie wytłaczania tradycyjnego z zasilaniem grawitacyjnym. Uplastycznianie w warunkach dozowanego zasilania jest szybsze, długość odcinka kanału ślimaka niezbędna do całkowitego uplastycznienia tworzywa rośnie, gdy zwiększa się jego natężenie przepływu. Ślimak wypełnia się całkowicie tworzywem jedynie w końcowej części wytłaczarki, przed głowicą. W pozostałej części jest wypełniony tylko częściowo. Obszar całkowitego zapełnienia ślimaka zależy od natężenia przepływu tworzywa i prędkości obrotowej ślimaka. Stopień wypełnienia ślimaka wzrasta, gdy

rośnie natężenie przepływu tworzywa (przy stałej prędkości obrotowej ślimaka), natomiast maleje, gdy rośnie prędkość obrotowa ślimaka (przy stałym natężeniu przepływu). Ciśnienie, generowane jedynie w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka, zwykle zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu i prędkości obrotowej ślimaka.

Przedstawiony model dosyć dobrze opisuje proces wytłaczania z dozowaniem tworzywa i może stanowić podstawę do modelowania rozwoju morfologii mieszanin w badanym procesie. Umożliwia dokładne określenie przestrzeni w kanale ślimaka, całkowicie zapełnionej tworzywem. Mikroreologiczne modelowanie rozwoju morfologii, możliwe w tej wyznaczonej przestrzeni, jak dotąd nie było prowadzone w odniesieniu do procesu wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem.

LITERATURA

- [1] Utracki L.A.: "Polymer Alloys and Blends – Thermodynamics and Rheology", Hanser Publisher, Munich 1989.
- [2] "Mixing and Compounding of Polymers" (red. Manas-Zloczower I.), Hanser Publisher, Munich 2009.
- [3] Utracki L.A., Shi Z.H.: *Polym. Eng. Sci.* **1992**, 32, 1824. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760322405>
- [4] Huneault M.A., Shi Z.H., Utracki L.A.: *Polym. Eng. Sci.* **1995**, 35, 115. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760350114>
- [5] Delamare L., Vergnes B.: *Polym. Eng. Sci.* **1996**, 36, 1685. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10565>
- [6] Potente H., Bastian M.: *Polym. Eng. Sci.* **2000**, 40, 727. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11202>
- [7] Lee S.H., White J.L.: *Int. Polym. Proc.* **1998**, 13, 247. <http://dx.doi.org/10.3139/217.980247>
- [8] Potente H., Bastian M., Flecke J., Schramm D.: *Int. Polym. Proc.* **2001**, 16, 131. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1633>
- [9] Wilczyński K., Jiang Q., White, J.L.: *Int. Polym. Proc.* **2007**, 22, 198. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2001>
- [10] Wilczyński K., White J.L.: *Polimery* **2008**, 53, 754.
- [11] Wilczyński K., Lewandowski A.: *Polimery* **2010**, 55, 883.
- [12] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
- [13] Wilczyński K., Tyszkiewicz A., Szymaniak Z.: *J. Mater. Proc. Technol.* **2001**, 109, 320. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00820-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00820-7)
- [14] Wilczyński K.: *J. Mater. Proc. Technol.* **2001**, 109, 308. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00821-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00821-9)
- [15] Domingues N., Gaspar-Cunha A., Covas J.A.: *Polym. Eng. Sci.* **2010**, 50, 2194. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.21756>
- [16] Ariffin A., Ahmad M.S.B.: *Polym. Plast. Technol. Eng.* **2011**, 50, 395. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.543228>
- [17] Carley J.F., Strub R.A., Mallouk R.S. i in.: *Ind. Eng. Chem.* **1953**, 45, 969. <http://dx.doi.org/10.1021/ie50521a030>
- [18] Maddock B.H.: *SPE Journal* **1959**, 15, 383.
- [19] Street L.F.: *Int. Plast. Eng.* **1961**, 1, 289.
- [20] Tadmor Z.: *Polym. Eng. Sci.* **1966**, 6, 185. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760060303>

- [21] Tadmor Z., Duvdevani I.J., Klein I.: *Polym. Eng. Sci.* **1967**, 7, 198. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760070313>
- [22] Tadmor Z., Klein I.: "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Van Nostrand Reinhold, New York 1970.
- [23] Agur E.E., Vlachopoulos J.: *Polym. Eng. Sci.* **1982**, 22, 1084. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760221706>
- [24] Vincelette A.R., Carreau P.J., Lafleur P.G.: *Int. Polym. Proc.* **1989**, 4, 232. <http://dx.doi.org/10.3139/217.890232>
- [25] Potente H., Hanhart W., Schoppner V.: *Int. Polym. Proc.* **1993**, 8, 335. <http://dx.doi.org/10.3139/217.930335>
- [26] Wilczyński K.: *Polym. Plast. Technol. Eng.* **1996**, 35, 449. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559608000931>
- [27] Altinkaynak A., Gupta M., Spalding M.A., Crabtree S.L.: *Int. Polym. Proc.* **2011**, 26, 182. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2419>
- [28] Nichols R.J., Kruder G.A.: *Proceedings of ANTEC* **1974**, 20, 462.
- [29] McKelvey J.M.: *Plast. Eng.* **1978**, June, 45.
- [30] Lopez-Latorre L., McKelvey J.M.: *Adv. Polym. Technol.* **1984**, 3, 355. <http://dx.doi.org/10.1002/adv.1984.060030404>
- [31] Isherwood D.P., Pieris R.N., Kassatly J.: *Trans. ASME* **1984**, 106, 132.
- [32] Gale M.: *Adv. Polym. Technol.* **1997**, 16, 251. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199711\)16:4%3C251::AID-ADV1%3E3.3.CO;2-J](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199711)16:4%3C251::AID-ADV1%3E3.3.CO;2-J)
- [33] Thompson M.R., Donoian G., Christiano J.P.: *Polym. Eng. Sci.* **2000**, 40, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11334>
- [34] Strand S.R., Spalding M.A., Hyun S.K.: *Proceedings of ANTEC* **1992**, 38, 2537.
- [35] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polym. Eng. Sci.* **2012**, 52, 1258. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.23076>
- [36] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *Int. Polym. Proc.* **2013**, 28, 34. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [37] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polym. Eng. Sci.* **2014**, 54, 2362. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>

Otrzymano 31 III 2014 r.

W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- P. Groch, K. Dziubek, K. Czaja — Silseskwioksany i ich zastosowanie w syntezie materiałów polimerowych
- J. Kowalonek, H. Kaczmarek, E. Mikuła — Badania jonomerów styrenowych poddanych działaniu plazmy (j. ang.)
- B. Jędrzejewska, M. Kowalska — Synteza i badania nowych, homodimerycznych barwników styrylobenzimidazoliowych jako fotoinicjatorów polimeryzacji rodnikowej monomerów akrylowych (j. ang.)
- A. Porąbka, K. Jurkowski, J. Laska — Popioły lotne jako napelniacze i środki zmniejszające palność polietyleno małej gęstości (j. ang.)
- Z. Bo, L. Jing-wei, L. Shu-guang, L. Yi-hui, H. Ju-tao — Odporność powłok epoksydowych na kruche pękanie w funkcji temperatury (j. ang.)
- M. Masłowski, M. Zaborski — Wpływ procesów starzenia termo- i fotoooksydacyjnego na właściwości mechaniczne magnetoreologicznych kompozytów elastomerowych
- M. Iwański, G. Mazurek — Wpływ dodatku wosku syntetycznego Fischera-Tropscha na właściwości funkcjonalne asfaltu
- M. Kucharek, P. Janas — Analiza wytrzymałościowa folii jadalnych na bazie ksantanu
- A. Raszowska-Kaczor, A. Stasiak, K. Janczak, E. Olewnik — Chemicznie sieciowane pianki polietylenowe o ograniczonej palności (j. ang.)