

Modelowanie procesu wytłaczania jednoślindakowego mieszanin polimerów z zastosowaniem ślimaków mieszających i dozowanego zasilania wytłaczarki

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

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.279](https://doi.org/10.14314/polimery.2016.279)

Streszczenie: Opracowano program symulacji procesu wytłaczania jednoślindakowego z zastosowaniem ślimaków mieszających i dozowanego zasilania. Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS z wykorzystaniem ślimaka mieszającego z sekcją intensywnego mieszania, utworzoną przez układ pierścieni mieszających. Wykonano obliczenia symulacyjne procesu obejmujące uplastycznianie tworzywa, rozkład ciśnienia tworzywa oraz stopień wypełnienia ślimaka. Wyniki symulacji zweryfikowano doświadczalnie.

Słowa kluczowe: wytłaczanie jednoślindakowe z dozowanym zasilaniem, ślimak mieszający, mieszanina PE-LD/PS, badania symulacyjno-doświadczalne.

Modeling for starve fed single-screw extrusion of polyblends using mixing screws

Abstract: Computer program has been developed for starve fed single screw extrusion with mixing screws. Simulation and experimentation for extrusion of PE-LD/PS blend have been performed. Mixing screw equipped with toothed disc mixing section has been applied. Melting of polymer, pressure profiles, and screw filling have been simulated and validated experimentally.

Keywords: single-screw extrusion with starve feeding, mixing screws, PE-LD/PS blend, simulation-experimental study.

Wytłaczarki jednoślindakowe zwykle zasilają się grawitacyjnie. Ślimak bez ograniczeń pobiera tworzywo z zasobnika i jest tym tworzywem całkowicie wypełniony. Ciśnienie generowane w strefie zasilania powoduje zagęszczanie tworzywa, co prowadzi do utworzenia ciągłej warstwy stałej. Tworzywo uplastycznia się powoli i jest nierównomiernie wymieszane. Wytłaczarki dwuślindakowe stanowią lepsze mieszalniki i tworzywo uplastycznia się w nich szybciej. Zwykle takie wytłaczarki są zasilane w sposób dozowany. Ostatnio podjęto próby zastosowania zasilania dozowanego w procesie wytłaczania jednoślindakowego mieszanin polimerów, których przetwórstwo jest związane z koniecznością intensyfikacji mieszania [1].

Rozwój morfologii mieszanin polimerów w procesie wytłaczania jest przedmiotem intensywnych badań. W odniesieniu do wytłaczania dwuślindakowego współbieżnego był on przedmiotem licznych prac zarówno doświadczalnych, jak i teoretycznych [2–6]. Brak natomiast takich prac dotyczących wytłaczania przeciwbieżnego,

ponieważ dopiero niedawno opracowano pierwsze modele tego procesu [7–10]. Słabiej opracowane jest modelowanie morfologii w procesie wytłaczania jednoślindakowego. Wilczyński w publikacji [11] jako pierwszy zaproponował stosunkowo prosty model, wykorzystujący fibrylację i rozpad włókien, a także deformację kropli i jej rozpad, w obszarze tworzywa uplastycznionego, wyznaczonym za pomocą programu SSEM (*single-screw extrusion model*) [12]. Domingues [13] przedstawił zaawansowany model wspomnianego procesu, opisujący rozwój morfologii mieszanin polimerów od początku stapiania tworzywa. Badania w tym zakresie podsumowali Ariffin i Ahmad [14].

Podstawą analizy rozwoju morfologii mieszanin jest termomechaniczny model przepływu tworzywa w procesie przetwórczym, ponieważ wspomniany rozwój określają lokalne pola naprężeń, prędkości, szybkości ścinania, temperatury i czasu rezydencji tworzywa. Wytłaczanie jednoślindakowe z zasilaniem grawitacyjnym jest dobrze poznane i opracowane. Tadmor jako pierwszy opracował model matematyczny uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce [15, 16] oraz zbudował pierwszy całościowy model procesu [17]. Następnie powstało kilka innych modeli, np. NEXTRUCAD [18], REX [19] czy SSEM [12]. Prace w zakresie modelowania wytłaczania

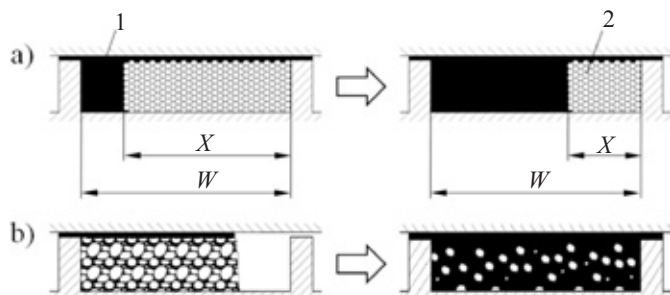
¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Techniki Wytwarzania, Zakład Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa.

*) Autor do korespondencji; e-mail: wilczynski_k@wp.pl

jednoślimakowego podsumował Altinkaynak [20].

Nieliczne badania procesu wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem ograniczały się do wytłaczania tworzyw termoplastycznych i doświadczalnej analizy procesu [21–25]. Zakres tych badań przedstawiono w [1]. Próbę modelowania wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem podjął jedynie Strand [26], który modyfikował równania transportu tworzywa w stanie stałym, znane z modelu wytłaczania tradycyjnego. W swoich rozważaniach nie uwzględnił jednak uplastyczniania tworzywa i mechanizmu wypełnienia ślimaka wytłaczarki.

Wilczyński [27, 28] zaproponował nowy mechanizm uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce z dozowanym zasilaniem, z wyróżnieniem uplastyczniania wskutek przewodzenia ciepła w strefie niewypełnionego ślimaka oraz uplastyczniania dyspersyjnego w strefie ślimaka wypełnionego. Na tej podstawie opracowano pierwszy całościowy model wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem [29].



Rys. 1. Mechanizm uplastyczniania: a) klasyczny mechanizm Tadmora, b) mechanizm dwuetapowy: 1 – tworzywo uplastycznione, 2 – warstwa stała, X – szerokość warstwy stałej tworzywa, W – szerokość kanału ślimaka

Fig. 1. Melting mechanism: a) classical mechanism of Tadmor, b) two-stage mechanism: 1 – molten polymer, 2 – solid bed, X – solid bed width, W – screw channel width

Ten mechanizm uplastyczniania, w zestawieniu z mechanizmem klasycznym, pokazano na rys. 1. Według mechanizmu klasycznego uplastycznianie rozpoczyna się od strony cylindra, gdzie tworzy się warstewka tworzywa uplastycznionego, zgarniana w stronę aktywnej ścianki zwoju ślimaka. W miarę uplastyczniania powiększa się obszar tworzywa stopionego, przy czym nie zmienia się wysokość warstwy stałej, zmniejsza się natomiast jej szerokość. W procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem, w niewypełnionej strefie ślimaka granulaty gromadzi się przy aktywnej ściance zwoju ślimaka i stapia się w wyniku przewodzenia ciepła. W wypełnionej części ślimaka niestopione cząstki tworzywa tworzą zawieszinę w tworzywie uplastycznionym i stapiają się pod wpływem ciepła rozpraszania energii.

Modelowanie wytłaczania jednoślimakowego z dozowanym zasilaniem mieszanin polimerów nie było dotąd opisywane w literaturze i dopiero niedawno pod-

jęto próbę modelowania takiego procesu prowadzonego z zastosowaniem klasycznych ślimaków [1]. Ślimaki klasyczne nie zapewniają jednak dobrego wymieszania tworzywa, dlatego wykorzystuje się rozwiązania niekonwencjonalne, w których ślimaki zawierają elementy intensyfikujące ścinanie i mieszanie tworzywa. Wyróżnia się elementy, w których dominują procesy ścinania (ang. *dispersive mixing*) oraz elementy, w których przeważają procesy mieszania (ang. *distributive mixing*). Intensyfikacja ścinania następuje w szczelinach elementów, np. zaporowych typu torpeda lub rowkowanych typu Maddock. W tego typu elementach występują obszary, gdzie strumień tworzywa podlega wielokrotnemu podziałowi i łączeniu, co powoduje intensywne mieszanie.

W pracy po raz pierwszy modelowano proces wytłaczania mieszanin polimerów z zastosowaniem ślimaków niekonwencjonalnych i dozowanego zasilania. Opracowano program symulacji procesu, a następnie wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS przy użyciu ślimaka z układem pierścieni mieszających, stanowiących sekcję intensywnego mieszania.

MODELOWANIE PROCESU WYTŁACZANIA

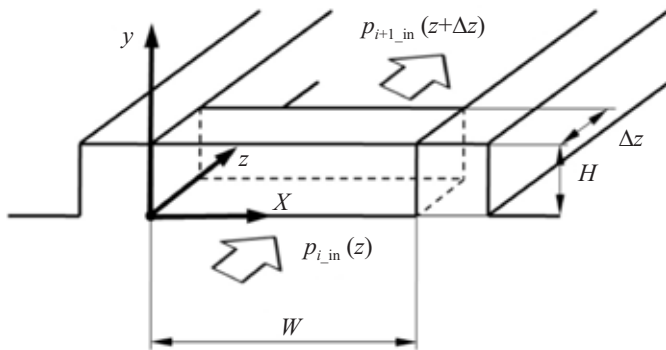
Proces wytłaczania przebiega dzięki współdziałaniu wytłaczarki i głowicy. Przepływ tworzywa w wytłaczarce jest sprzężony z przepływem w głowicy, zgodnie z zasadą zachowania ciągłości przepływu. Całościowy model wytłaczania obejmuje modele elementarne procesu, opisujące transport tworzywa w stanie stałym, uplastycznianie oraz przepływ tworzywa uplastycznionego w wytłaczarce i głowicy.

W procesie wytłaczania klasycznego natężenie przepływu tworzywa nie jest znane i wynika ze współpracy wytłaczarki z głowicą. Warunki współdziałania wyznacza punkt pracy wytłaczarki, określający wydajność wytłaczania i ciśnienie wytłaczanego tworzywa. Wspomniany punkt pracy wyznacza się w procedurze iteracyjnej, badającej zgodność przyrostu ciśnienia w wytłaczarce ze spadkiem ciśnienia w głowicy. W procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem natężenie przepływu jest określone, ale nie jest znany obszar, w którym tworzywo zapełnia ślimak. Wyznacza się go w procedurze iteracyjnej, poszukującej zbieżności wyników obliczeń temperatury tworzywa i temperatury topnienia tworzywa w miejscu, w którym to topnienie się kończy.

Proces wytłaczania obejmuje następujące po sobie, połączone, elementarne przestrzenie, w których natężenie przepływu jest stałe. Wartości parametrów procesu, takich jak: ciśnienie i temperatura, na końcu każdej elementarnej przestrzeni przepływu są równe wartościom tych parametrów na początku następnego elementu (rys. 2):

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

gdzie: $p_{i_out}(z + \Delta z)$ – wartość parametru na końcu i -tego elementu, $p_{i+1_in}(z + \Delta z)$ – wartość parametru na początku ($i + 1$) elementu, z – położenie wzdłuż długości kanału, Δz – długość elementu.



Rys. 2. Schemat obliczeń: p – parametr procesu, $p_{i_in}(z)$ – wartości wejściowe, $p_{i+1_in}(z + \Delta z)$ – wartości wyjściowe, W – szerokość kanału ślimaka, H – wysokość kanału, Δz – odcinek objęty obliczeniami

Fig. 2. Computation scheme: p – process parameter, $p_{i_in}(z)$ – input data, $p_{i+1_in}(z + \Delta z)$ – output data, W – screw channel width, H – screw channel height, Δz – computation increment

Podstawę modelu procesu badanego w tej pracy stanowi model uplastyczniania tworzywa [28], opisany też w [1]. Opracowano całościowy model komputerowy procesu, definiujący proces wytłaczania jednoślismakowego z dozowanym zasilaniem i, z powodzeniem, zastosowano go do symulacji wytłaczania polimerów termoplastycznych [29]. Jest to model o parametrach skupionych.

Modelowanie procesów przetwórstwa mieszanin wymaga m.in. odpowiedniego zdefiniowania ich właściwości, zazwyczaj niedostępnych w literaturze. W tym celu zmodyfikowano odpowiednio algorytm obliczeń komputerowego modelu procesu. Właściwości mieszaniny wyznaczano zgodnie z regułą mieszania, uwzględniając udział objętościowy składników.

Procedura obliczeniowa modelu polega na określaniu profilu uplastyczniania tworzywa, począwszy od zasobnika w kierunku głowicy, czyli „do przodu”, oraz profilu ciśnienia i stopnia wypełnienia ślimaka w kierunku odwrotnym, od głowicy do zasobnika, czyli „do tyłu”. Profil temperatury jest obliczany w kierunku „do przodu”

w strefie uplastyczniania, natomiast w strefie dozowania – w kierunku „do tyłu”. Takie postępowanie umożliwia wyznaczenie miejsca, w którym ślimak całkowicie wypełnia się tworzywem i w którym potencjalnie następuje zmiana mechanizmu uplastyczniania tworzywa. W wypadku zastosowania ślimaków klasycznych, obliczenia modelowe prowadzi się w kolejnych przestrzeniach elementarnych ciągłego kanału ślimaka [1].

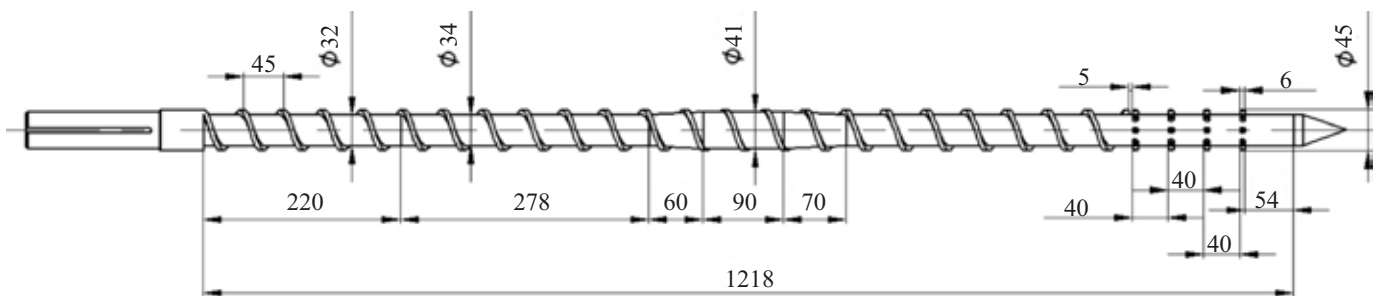
Modelowanie procesu wytłaczania z wykorzystaniem ślimaków niekonwencjonalnych przebiega odmiennie. Przestrzeń objęta procedurą obliczeń nie jest ciągła, gdyż „zakłócają ją” elementy intensyfikujące mieszanie lub ścinanie. Odpowiednie modele przepływu tworzywa w tych elementach implementuje się do całościowego modelu procesu.

W rozpatrywanym wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem, z zastosowaniem ślimaka mieszającego z sekcją intensywnego mieszania, utworzoną przez układ pierścieni mieszających, wykorzystano rozwiązania użyte w modelowaniu wytłaczania tradycyjnego [30]. Można też posłużyć się bezwymiarowymi charakterystykami przepływu tworzywa, wyznaczanymi w trójwymiarowym, nienewtonowskim modelowaniu przepływu za pomocą programu Polyflow [31], a następnie implementować je do całościowego modelu procesu w postaci modeli regresyjnych. Taką procedurę zastosowano do modelowania wytłaczania przeciwbieżnego [10]. Obliczenia tego typu są dokładne, ale czasochłonne.

BADANIA SYMULACYJNO-DOŚWIADCZALNE

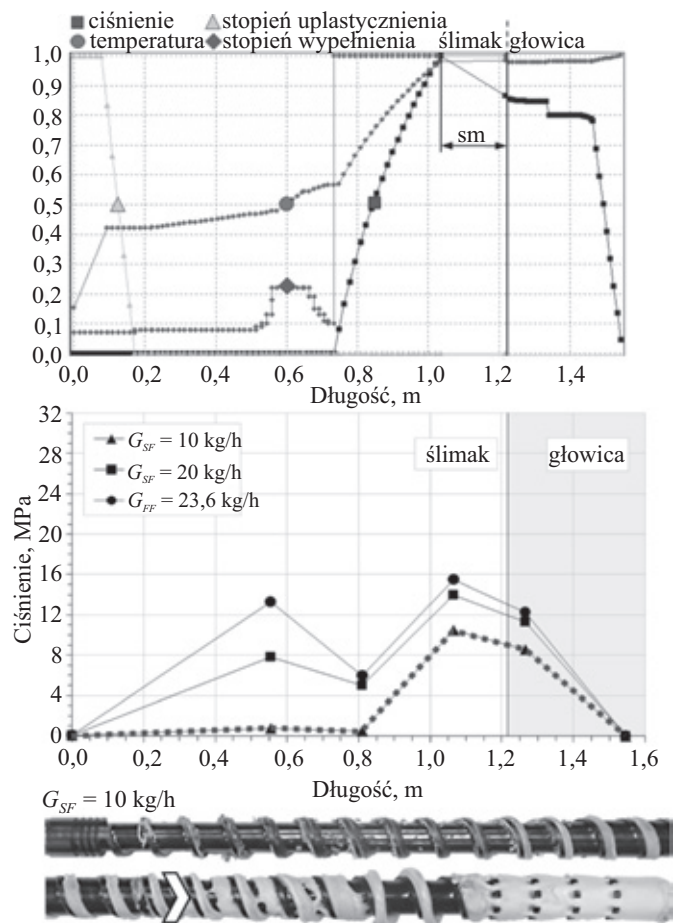
Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania mieszaniny polietylenu małej gęstości (Basell Orlen, Purell 3020D) i polistyrenu (BASF, Polystyrol 158K) o składzie: 85 % mas. PE-LD, gęstości w stanie stałym $\rho = 0,927 \text{ g/cm}^3$, temperaturze topnienia $T_m = 114 \text{ }^\circ\text{C}$, masowym wskaźniku szybkości płynięcia $MFR = 0,3 \text{ g/10 min}$ ($190 \text{ }^\circ\text{C}$; 2,16 kg), i 15 % mas. PS o gęstości w stanie stałym $\rho = 1,040 \text{ g/cm}^3$, temperaturze mięknięcia $T_g = 109 \text{ }^\circ\text{C}$, masowym wskaźniku szybkości płynięcia $MFR = 3,0 \text{ g/10 min}$ ($200 \text{ }^\circ\text{C}$; 5,00 kg).

W badaniach wykorzystano wytłaczarkę Metalchem T-45 wyposażoną w dozownik ślimakowy. Zastosowano ślimak mieszający z sekcją intensywnego mieszania (rys. 3) oraz głowicę do wytłaczania prętów o średnicy



Rys. 3. Ślimak mieszający

Fig. 3. Mixing screw



Rys. 4. Przebieg wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS (sm – sekcja mieszająca): $N = 80$ obr/min, zasilanie z dozowaniem $G_{SF} = 10$ kg/h (strzałka wskazuje początek wypełnienia ślimaka)
 Fig. 4. Validation for extrusion of PE-LD/PS (sm – mixing section): $N = 80$ rpm, feed rate $G_{SF} = 10$ kg/h (an arrow shows the beginning of the fully filled region)

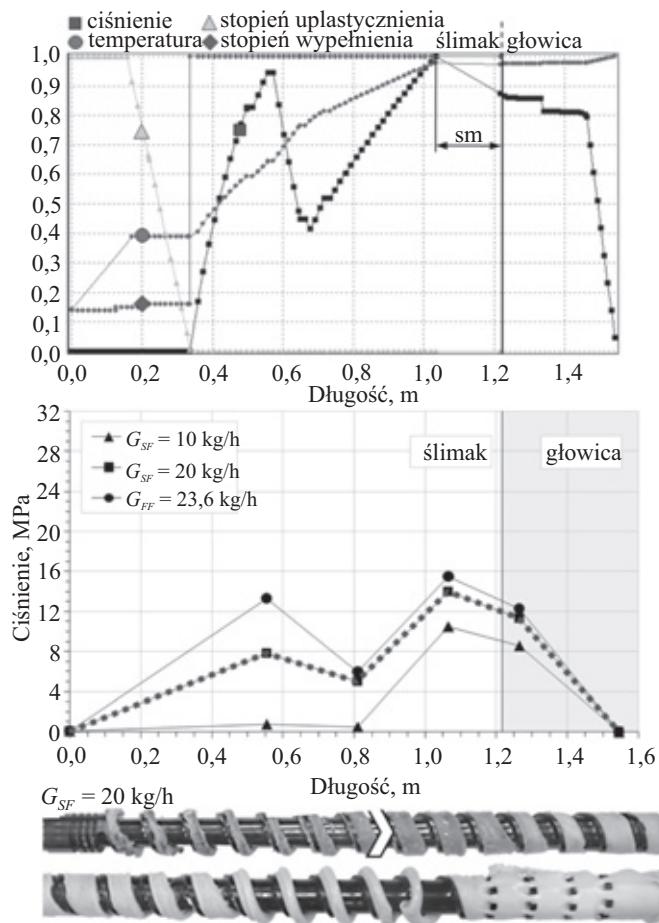
$d = 5$ mm. Tensometryczne czujniki ciśnienia umieszczono w cylindrze i głowicy. Metodę badań opisano w publikacji [1].

Badaniami objęto proces z tradycyjnym grawitacyjnym zasilaniem wytłaczarki oraz z zasilaniem dozowanym i prędkością obrotową ślimaka: $N = 20, 50, 80$ obr/min. Ustalono następujące wartości temperatury w kolejnych strefach wytłaczarki: $T_I = 170$ °C, $T_{II} = 180$ °C, $T_{III} = 180$ °C, $T_{IV} = 180$ °C, $T_C = 180$ °C.

Lepkość mieszaniny wyznaczono na podstawie wyników badań własnych [1]. Pozostałe dane materiałowe zaczerpnięto z literatury [np. 17, 18, 32]. Do opisu lepkości zastosowano równanie Kleina, zgodnie z którym:

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

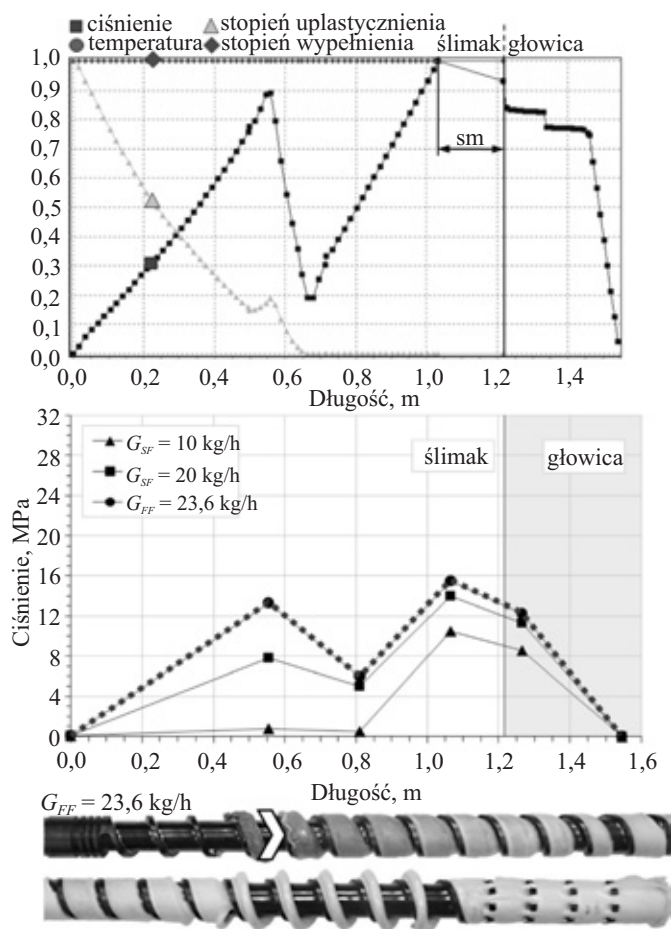
gdzie: η – lepkość, $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, T – temperatura, A – parametry równania Kleina ($A_0 = 14,49132073$; $A_1 = -0,812149514$; $A_{11} = -0,010400416$; $A_{12} = 0,00157898$; $A_2 = -0,029769873$; $A_{22} = -0,0000289218$).



Rys. 5. Przebieg wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS (sm – sekcja mieszająca): $N = 80$ obr/min, zasilanie z dozowaniem $G_{SF} = 20$ kg/h (strzałka wskazuje początek wypełnienia ślimaka)
 Fig. 5. Validation for extrusion of PE-LD/PS (sm – mixing section): $N = 80$ rpm, feed rate $G_{SF} = 20$ kg/h (an arrow shows the beginning of the fully filled region)

Wpływ natężenia przepływu na przebieg wytłaczania z prędkością obrotową ślimaka $N = 80$ obr/min i dozowaniem $G = 10$ kg/h lub $G = 20$ kg/h pokazano na rys. 4–7. W wyniku wytłaczania tradycyjnego w takich warunkach uzyskano wydajność 23,6 kg/h.

Wyniki symulacji przedstawiono w postaci bezwymiarowej, obejmującej rozkład ciśnienia i temperatury tworzywa, profil stopnia uplastycznienia tworzywa i wypełnienia ślimaka. Zmiany parametrów procesu w obszarze sekcji intensywnego mieszania przedstawiono w sposób liniowy. Stopień uplastycznienia wyrażano jako stosunek objętości tworzywa w stanie stałym do całkowitej objętości tworzywa w danej przestrzeni obliczeń. Jest on równy jedności, gdy cała objętość tworzywa jest w stanie stałym i równy zero, gdy tworzywo jest całkowicie stopione. Stopień wypełnienia ślimaka definiuje stosunek objętości tworzywa w danej przestrzeni do objętości tej przestrzeni. Równa się jedności, gdy kanał ślimaka jest całkowicie wypełniony tworzywem, natomiast gdy jest pusty – równa się zero.

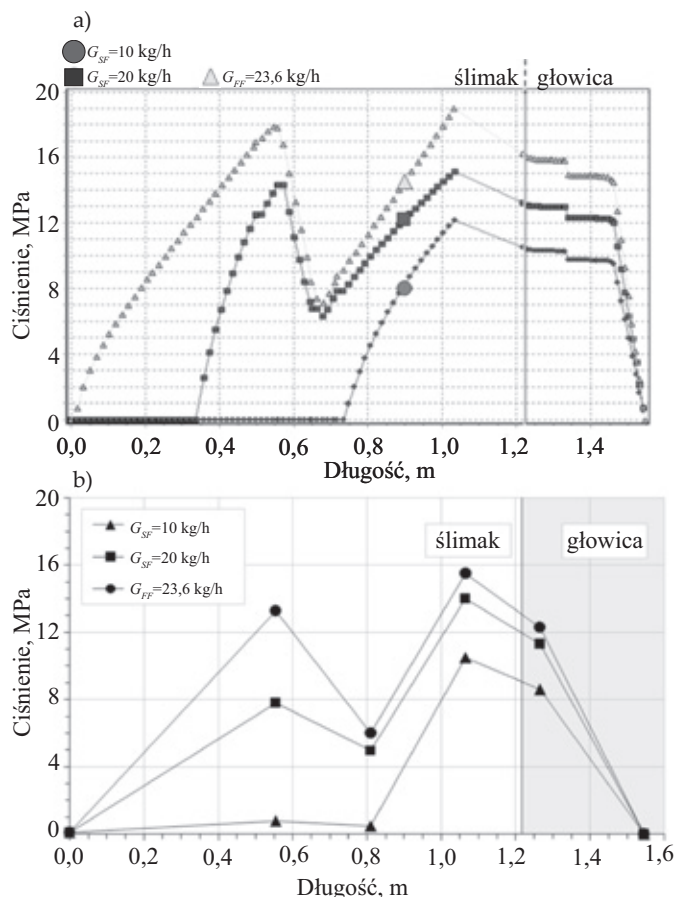


Rys. 6. Przebieg wytłaczania PE-LD/PS (sm – sekcja mieszająca): $N = 80$ obr/min, zasilanie grawitacyjne $G_{FF} = 23,6$ kg/h (strzałka wskazuje początek wypełnienia ślimaka)

Fig. 6. Validation for extrusion of PE-LD/PS (ms – mixing section): $N = 80$ rpm, flood feeding $G_{FF} = 23.6$ kg/h (an arrow shows the beginning of the fully filled region)

Wypełnienie ślimaka określano na podstawie długości obszaru całkowicie wypełnionego tworzywem. Początek tego obszaru oznaczono strzałką. Ten punkt odpowiadał stopniowi wypełnienia równemu jedności. Wypełnienie ślimaka zwiększało się ze wzrostem natężenia przepływu. Rozbieżności między wartościami stopnia wypełnienia, symulowanymi i wyznaczonymi doświadczalnie, zarówno przy natężeniu przepływu 10 kg/h, jak i 20 kg/h, nie przekraczały 10 %.

Przebieg uplastycznienia tworzywa oceniano na podstawie stopnia uplastycznienia. Ze względu na fakt, że wycięcie odpowiednich próbek tworzywa i uzyskanie obrazu ich przekroju poprzecznego w obszarze niecałkowitego zapelnienia ślimaka jest trudne, ocenę przebiegu uplastycznienia ograniczono do oceny długości obszaru, w którym uplastycznianie zachodzi. Symulacja uplastycznienia dała słabsze wyniki, niż symulacja wypełnienia ślimaka, ale zawsze obserwowano szybsze uplastycznianie w procesie wytłaczania z zasilaniem dozowanym niż w procesie wytłaczania tradycyjnego.



Rys. 7. Przebieg wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS: $N = 80$ obr/min, zasilanie z dozowaniem $G_{SF} = 10$ kg/h, $G_{SF} = 20$ kg/h oraz zasilanie grawitacyjne $G_{FF} = 23,6$ kg/h: a) wyniki obliczeń, b) wyniki pomiarów

Fig. 7. Validation for pressure computations for extrusion of PE-LD/PS at $N = 80$ rpm, feed rates $G_{SF} = 10$ kg/h, $G_{SF} = 20$ kg/h and flood feeding $G_{FF} = 23.6$ kg/h: a) computation, b) experimental

Podczas wytłaczania z natężeniem $G = 10$ kg/h (rys. 4) uplastycznianie przebiegało zgodnie z pierwszym mechanizmem uplastyczniania. Początkowo materiał ogrzewano do temperatury topnienia (stopień uplastycznienia był równy jedności). W temperaturze topnienia rozpoczynało się uplastycznianie i wartość stopnia uplastycznienia zmniejszała się do zera przy całkowitym stopieniu. Proces uplastyczniania przebiegał stosunkowo szybko. Obliczona długość obszaru uplastyczniania różniła się o ok. 20 % od wartości uzyskanej doświadczalnie.

W procesie wytłaczania z natężeniem $G = 20$ kg/h (rys. 5) również dominował pierwszy mechanizm uplastyczniania. Początkowo materiał ogrzewano do temperatury topnienia, stopień uplastycznienia był równy jedności, a odpowiadający mu obszar był prawie dwukrotnie dłuższy niż poprzednio, gdyż większe było natężenie przepływu. W temperaturze topnienia rozpoczynało się uplastycznianie materiału i stopień uplastycznienia się zmniejszał. Pod koniec stapiania, gdy kanał ślimaka

wypełnił się całkowicie tworzywem, ujawnił się drugi mechanizm uplastyczniania. Długość obszaru uplastyczniania była wyraźnie większa, a koniec uplastyczniania był znacznie dalej niż poprzednio. Uplastycznianie również przebiegało szybko. Wyniki obliczeń różniły się o ok. 10 % od wyników doświadczenia.

Przebieg uplastyczniania podczas wytłaczania tradycyjnego (rys. 6) był odmienny, ale zgodny z naszymi doświadczeniami. W tym wypadku stopień uplastycznienia definiuje (rys. 1a) stosunek szerokości warstwy stałej tworzywa do szerokości kanału ślimaka X/W . Proces uplastyczniania rozpoczął się wówczas, gdy temperatura cylindra była wyższa niż temperatura topnienia tworzywa. Stosunek X/W stopniowo zmniejszał się do zera (przy końcu strefy sprężania). Możliwy jest jednak miejscowy wzrost linii X/W , wynikający ze zmiany kształtu geometrycznego kanału ślimaka.

Weryfikację wyników obliczeń dotyczących rozkładu ciśnienia przedstawia rys. 7. Ciśnienie było generowane tylko w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka. Profil ciśnienia był dobrze przewidywany, w odniesieniu zarówno do wytłaczania z zasilaniem dozowanym, jak i wytłaczania tradycyjnego, chociaż w pobliżu głowicy ciśnienie było przeszacowane. Ciśnienie zwiększało się ze wzrostem natężenia przepływu. Największe wartości ciśnienia zarejestrowano podczas wytłaczania tradycyjnego. Niewielkie zmniejszenie natężenia przepływu z $G = 23,6$ kg/h (wytłaczanie tradycyjne) do $G = 20$ kg/h (wytłaczanie z zasilaniem dozowanym), powodowało znaczne zmniejszenie ciśnienia w wyłaczarce, o ok. 20 %. W związku z tym zużycie energii też było wyraźnie mniejsze.

PODSUMOWANIE

Opracowano program symulacji wytłaczania jednoślismakowego z zastosowaniem ślimaków mieszających oraz dozowanego zasilania. Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS. Jest to pierwsza całościowa symulacja tego typu procesu w odniesieniu do mieszaniny polimerów, obejmująca przebieg uplastyczniania tworzywa, rozkład ciśnienia oraz stopnia wypełnienia ślimaka.

Potwierdzono, że uplastycznianie mieszaniny PE-LD/PS w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem przebiega odmiennie niż w procesie tradycyjnym i jest szybsze. Długość obszaru uplastyczniania zwiększa się wraz z natężeniem przepływu. Ślimak wypełnia się tworzywem całkowicie jedynie w końcowej części wyłaczarki. W pozostałej części jest wypełniony częściowo. Obszar całkowitego wypełnienia ślimaka zależy od natężenia przepływu tworzywa i prędkości obrotowej ślimaka. Obszar całkowitego wypełnienia ślimaka zwiększa się, gdy natężenie przepływu rośnie (przy stałej prędkości obrotowej ślimaka), maleje natomiast, gdy rośnie prędkość obrotowa ślimaka (przy stałym natężeniu przepływu). Ciśnienie jest generowane jedynie w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka i zwiększa się z natężeniem przepływu.

Przedstawiony model może stanowić podstawę do opisu rozwoju morfologii mieszanin w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem. Umożliwia zlokalizowanie przestrzeni, w której ślimak jest całkowicie wypełniony tworzywem. W tej przestrzeni można dokonać mikroreologicznego opisu kształtowania się morfologii. Takie modelowanie, jak dotąd, nie było prowadzone w odniesieniu do procesu jednoślismakowego z zasilaniem dozowanym.

LITERATURA

- [1] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2015**, 60, 199. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.199>
- [2] Huneault M.A., Shi Z.H., Utracki L.A.: *Polymer Engineering and Science* **1995**, 35, 115. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760350114>
- [3] Delamare L., Vergnes B.: *Polymer Engineering and Science* **1996**, 36, 1685. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10565>
- [4] Potente H., Bastian M.: *Polymer Engineering and Science* **2000**, 40, 727. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11202>
- [5] Lee S.H., White J.L.: *International Polymer Processing* **1998**, 13, 247. <http://dx.doi.org/10.3139/217.980247>
- [6] Potente H., Bastian M., Flecke J., Schramm D.: *International Polymer Processing* **2001**, 16, 131. <http://dx.doi.org/10.3139/217.1633>
- [7] Wilczyński K., Jiang Q., White J.L.: *International Polymer Processing* **2007**, 22, 198. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2001>
- [8] Wilczyński K., White J.L.: *Polimery* **2008**, 53, 754.
- [9] Wilczyński K., Lewandowski A.: *Polimery* **2010**, 55, 883.
- [10] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
- [11] Wilczyński K., Tyszkiewicz A., Szymaniak Z.: *Journal of Materials Processing Technology* **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)
- [12] Wilczyński K.: *Journal of Materials Processing Technology* **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)
- [13] Domingues N., Gaspar-Cunha A., Covas J.A.: *Polymer Engineering and Science* **2010**, 50, 2194. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.21756>
- [14] Ariffin A., Ahmad M.S.B.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2011**, 50, 395. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.543228>
- [15] Tadmor Z.: *Polymer Engineering and Science* **1966**, 6, 185. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760060303>
- [16] Tadmor Z., Duvdevani I., Klein I.: *Polymer Engineering and Science* **1967**, 7, 198. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760070313>
- [17] Tadmor Z., Klein I.: "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Van Nostrand Reinhold, New York 1970.
- [18] Acur E.E., Vlachopoulos J.: *Polymer Engineering and Science* **1982**, 22, 1084.

- <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760221706>
- [19] Potente H., Hanhart W., Schoppner V.: *International Polymer Processing* **1993**, 8, 335.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.930335>
- [20] Altinkaynak A., Gupta M., Spalding M.A., Crabtree S.L.: *International Polymer Processing* **2011**, 26, 182.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2419>
- [21] McKelvey J.M., Steingiser S.: *Plastics Engineering* **1978**, June, 45.
- [22] Lopez-Latorre L., McKelvey J.M.: *Advances in Polymer Technology* **1984**, 3, 355.
<http://dx.doi.org/10.1002/adv.1984.060030404>
- [23] Isherwood D.P., Pieris R.N., Kassatly J.: *Transactions of ASME* **1984**, 106, 132.
- [24] Gale M.: *Advances in Polymer Technology* **1997**, 16, 251.
[http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199711\)16:4<251::AID-ADV1>3.0.CO;2-U](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199711)16:4<251::AID-ADV1>3.0.CO;2-U)
- [25] Thompson M.R., Donoian G., Christiano J.P.: *Polymer Engineering and Science* **2000**, 40, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.11334>
- [26] Strand S.R., Spalding M.A., Hyun S.K.: *Proceedings of ANTEC* **1992**, 38, 2537.
- [27] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 1258.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23076>
- [28] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *International Polymer Processing* **2013**, 28, 34.
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [29] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [30] Wilczyński K.: *Polimery* **1997**, 42, 706.
- [31] Wilczyński K., Tyszkiewicz A.: *Polimery* **1996**, 41, 107.
- [32] Michaeli W.: "Extrusion Dies for Plastics and Rubber", Hanser Publ., Munich 2003.

Otrzymano 1 IV 2015 r.