

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

Krzysztof J. Wilczyński<sup>1)</sup>, \*) , Andrzej Nastaj<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.357](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.357)

**Streszczenie:** Wykonano badania symulacyjne i doświadczalne wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem mieszaniny PE-LD/PS. Zastosowano ślimak niekonwencjonalny z sekcją intensywnego ścinania, utworzoną przez rowkowy element Maddocka. Obliczenia symulacyjne procesu obejmowały uplastycznianie tworzywa, rozkład ciśnienia i temperatury tworzywa w obszarze ślimaka oraz stopień jego wypełnienia. Wyniki obliczeń zweryfikowano doświadczalnie.

**Słowa kluczowe:** wytłaczanie jednoślindakowe, ślimak niekonwencjonalny, dozowane zasilanie, modelowanie procesu wytłaczania, mieszanina PE-LD/PS.

## Modelling of starve fed single-screw extrusion of polyblends using non-conventional screws

**Abstract:** A computer model has been developed for starve fed single-screw extrusion with non-conventional screws. Simulation and experimentation for extrusion of PE-LD/PS blend have been carried out. Non-conventional screw equipped with Maddock shearing element has been applied. Melting of polymer, pressure, temperature profiles screw filling have been simulated and validated experimentally.

**Keywords:** single-screw extrusion with starve fed, non-conventional screw, PE-LD/PS blend, modelling the extrusion process.

Wytłaczarki jednoślindakowe zazwyczaj zasilają się w sposób grawitacyjny. Dozowane zasilanie wytłaczarek dwuślindakowych sprzyja lepszemu wymieszanemu składników tworzywa i szybszemu jego uplastycznieniu. Podjęto więc próby zastosowania dozowanego zasilania wytłaczarki w procesie jednoślindakowym [1, 2].

Pierwszy całościowy model wytłaczania jednoślindakowego z zasilaniem grawitacyjnym opracował Tadmor [3], później powstało kilka innych modeli, np. NEXTRU-CAD [4], REX [5] czy SSEM [6], a w pracy [7] Altinkaynak podsumował zagadnienia modelowania tego procesu.

Badania wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem ograniczały się, jak dotychczas, głównie do tworzyw termoplastycznych i doświadczalnej analizy procesu, np. [8–11]. Zakres tych badań przedstawiono w [12].

W [12, 13] podjęto próbę zastosowania dozowanego zasilania w procesie wytłaczania jednoślindakowego mieszanin polimerów, których przetwórstwo wymaga intensyfikacji zarówno mieszania, jak i ścinania.

Procesy mieszania tworzywa w procesie wytłaczania dwuślindakowego współbieżnego były przedmiotem wielu prac, np. [14–18], natomiast w wypadku wytłaczania przeciwbieżnego takich badań dotąd nie prowadzono. Dopiero niedawno opracowano pierwsze modele tego procesu [19–22]. Znacznie słabiej są poznane procesy mieszania podczas wytłaczania jednoślindakowego. Pierwszy opracowany model rozwoju morfologii mieszaniny był stosunkowo prosty [23]. Podstawowe zjawiska fibrylacji i rozpadu włókien, a następnie deformacji kropli i jej rozpadu opisywał on tylko w obszarze tworzywa uplastycznego. Dopiero Domingues [24] przedstawił bardziej zaawansowany model, uwzględniający rozwój morfologii od początku stapiania tworzywa. Badania w tym zakresie opisali też Ariffin i Ahmad [25].

Zagadnienie modelowania procesu wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem podjęto niedawno. Wilczyński [26], na podstawie intensywnych badań doświadczalnych [2], zaproponował mechanizm uplastyczniania tworzywa w tym procesie, przy czym wyodrębnił uplastycznianie w wyniku przewodzenia ciepła w obszarze niewypełnionego ślimaka oraz uplastycznianie dyspersyjne w obszarze ślimaka wypełnionego. W [27] opracował pierwszy całościowy model procesu.

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

\*) Autor do korespondencji; e-mail: [wilczynski\\_k@wp.pl](mailto:wilczynski_k@wp.pl)

W [12] podjęto próbę modelowania wytłaczania jednoślismakowego z dozowanym zasilaniem w odniesieniu do mieszanin polimerów. Zastosowane ślimaki klasyczne nie zapewniają jednak dobrego wymieszania.

W celu zwiększenia stopnia wymieszania tworzyw w procesie wytłaczania wykorzystuje się niekonwencjonalne rozwiązania ślimaków. Dobre wymieszanie tworzywa oznacza równomierne rozproszczenie składników przetwarzanego materiału (mieszanie rozpraszające, ang. *distributive mixing*) i ich odpowiednie rozdrobnienie (mieszanie rozdrabniające, ang. *dispersive mixing*). Niekonwencjonalne ślimaki są wyposażone w elementy intensyfikujące zarówno rozdrabnianie (ścianianie), jak i rozpraszanie (mieszanie) składników tworzywa. Elementy rozdrabniające zawierają szczeliny, w których tworzywo ulega intensywnemu ścianianiu, np. elementy zaporowe typu torpeda lub elementy rowkowane typu Maddock. W elementach rozpraszających można wyróżnić obszary, w których strumień tworzywa ulega wielokrotnemu podziałowi i łączeniu, co powoduje intensywne mieszanie.

W [13] podjęto próbę modelowania procesu wytłaczania jednoślismakowego z dozowanym zasilaniem mieszanin, z zastosowaniem ślimaków typu mieszającego. Niniejsza praca dotyczy modelowania procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem mieszanin polimerów, z zastosowaniem ślimaków typu ścinającego. Po raz pierwszy opracowano model komputerowy procesu oraz wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS z wykorzystaniem ślimaka typu Maddock.

## MODELOWANIE PROCESU

Całościowy model procesu wytłaczania stanowi połączenie modeli opisujących: transport tworzywa w stanie stałym, uplastycznianie tworzywa oraz przepływ tworzywa uplastycznionego w wytłaczarce i w głowicy. Zakłada się, że wytłaczanie przebiega w szeregowo połączonych elementarnych przestrzeniach, w których natężenie przepływu jest stałe. Wartości parametrów procesu, np. ciśnienia, na końcu każdej elementarnej przestrzeni przepływu są równe wartościom tych parametrów na początku następnej przestrzeni.

W procesie wytłaczania tradycyjnego natężenie przepływu tworzywa wynika z charakterystyki pracy wytłaczarki i głowicy, określanej przez tzw. punkt pracy wytłaczarki. Wyznacza się go w procedurze iteracyjnej, w której bada się zgodność przyrostu ciśnienia w wytłaczarce ze spadkiem ciśnienia w głowicy. W procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem dane jest natężenie przepływu, ale nie jest znany obszar, w którym tworzywo wypełnia ślimak. Obszar ten wyznacza się w procedurze iteracyjnej, w której poszukuje się zbieżności wyników obliczeń temperatury tworzywa i jego temperatury topnienia, w miejscu, gdzie to topnienie się kończy.

Procedurę obliczeniową modelowania procesu wytłaczania z dozowanym zasilaniem, w odniesieniu do wytłaczania mieszanin polimerów z zastosowaniem ślimaków klasycznych, szczegółowo omówiono w [12]. W wypadku takich ślimaków obliczenia modelowe są prowadzone w kolejnych przestrzeniach elementarnych ciągłego uzwojenia ślimaka.

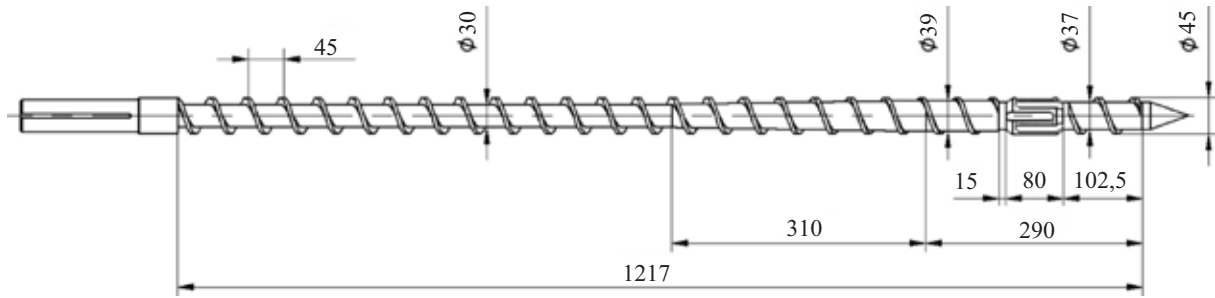
W odniesieniu do ślimaków niekonwencjonalnych przestrzeń obliczeń nie jest ciągła, „zakłócają” ją elementy intensywnego mieszania lub ścinania. Odpowiednie modele przepływu tworzywa w poszczególnych elementach są implementowane do całościowego modelu procesu.

W wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem, przy użyciu ślimaka z sekcją intensywnego ścinania typu Maddock, wykorzystano rozwiązanie stosowane do modelowania wytłaczania tradycyjnego [28]. Element Maddocka (rys. 1) stanowi układ par rowków (nie ma między nimi przepływu tworzywa), z których jeden jest rowkiem wlotowym (otwartym na wlocie i zamkniętym u wylotu), a drugi rowkiem wylotowym (zamkniętym na wlocie i otwartym u wylotu). Rowek wlotowy jest oddzielony od rowka wylotowego zwojem zaporowym, nad którym przepływa tworzywo, ulegając intensywnemu ścianianiu w szczelinie między zwojem a cylindrem wytłaczarki. Rowki mogą być prostoliniowe lub śrubowe, o różnym kształcie przekroju poprzecznego.

Zgodnie z przyjętym rozwiązaniem spadek ciśnienia w elemencie Maddocka jest równy różnicy ciśnienia na początku kanału wlotowego i na końcu kanału wylotowego. Natężenie przepływu w rowku wlotowym zmniejsza się w kierunku wyznaczonym przez długość kanału w wyniku przepływu przeciekowego tworzywa nad zwojem zaporowym do rowka wylotowego, w którym z kolei to natężenie się zwiększa. Na podstawie równania ciągłości przepływu i przy założeniu, że suma gradientów ciśnienia w obydwu kanałach jest stała wzdłuż długości elementu, można wyznaczyć rozkład ciśnienia w obydwu kanałach, a następnie całkowity spadek ciśnienia w elemencie. Szczegóły rozwiązania przedstawiono w [28].

Do modelowania procesu wytłaczania można też zastosować bezwymiarowe charakterystyki przepływu tworzywa, które wyznacza się na drodze trójwymiarowego, nienewtonowskiego modelowania przepływu – np. za pomocą programu ANSYS-Polyflow [29] – następnie wprowadza się do modelu procesu w postaci odpowiednich modeli regresyjnych. Taką procedurę wykorzystano do modelowania wytłaczania przeciwbieżnego [22]. Obliczenia tego typu są dokładne, ale czasochłonne.

Modelowanie przetworstwa mieszanin wymaga odpowiedniego zdefiniowania właściwości przetwarzanego materiału, które zwykle nie są dostępne w literaturze. Dlatego zmodyfikowano algorytm obliczeń modelu komputerowego procesu. Cechy materiałowe mieszaniny, z wyjątkiem charakterystyki reologicznej, wyznaczano w sposób uproszczony wg reguły mieszania.



Rys. 1. Ślimak typu Maddock (wymiary w mm)

Fig. 1. Maddock screw (dimensions in mm)

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

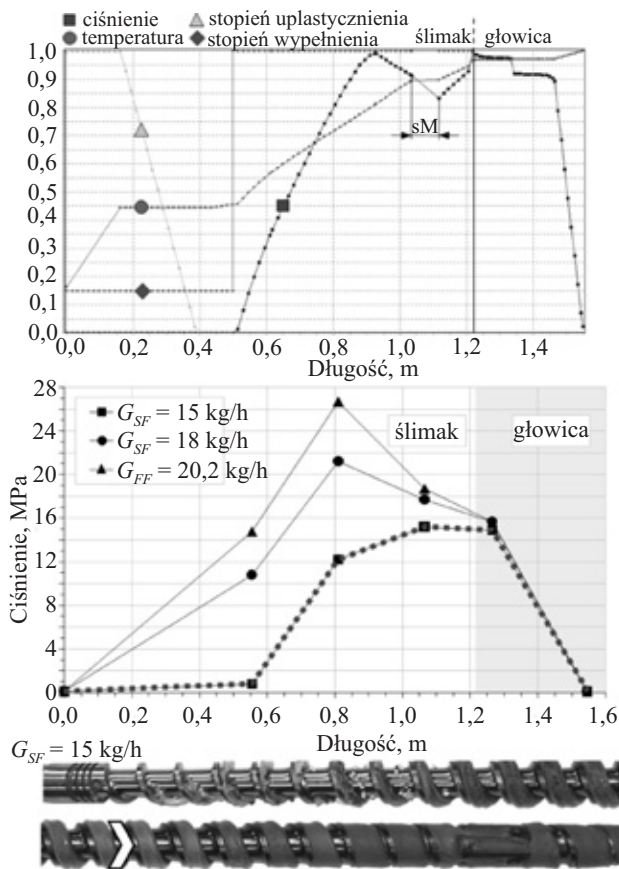
Badano proces wytłaczania mieszaniny polietylenu małej gęstości (85 % mas. PE-LD, Basell Purell 3020D): gęstość w stanie stałym  $\rho = 0,927 \text{ g/cm}^3$ , temperatura topnienia  $T_m = 114 \text{ }^\circ\text{C}$ , masowy wskaźnik szybkości płynięcia  $MFR = 0,3 \text{ g/10 min}$  ( $190 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2,16 kg) i polistyrenu (15 % mas. PS, BASF Polystyrol 158K): gęstość w stanie stałym  $\rho = 1,040 \text{ g/cm}^3$ , temperatura mięknie-

nia  $T_g = 109 \text{ }^\circ\text{C}$ , masowy wskaźnik szybkości płynięcia  $MFR = 3,0 \text{ g/10 min}$  ( $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 5,00 kg).

### Metodyka badań

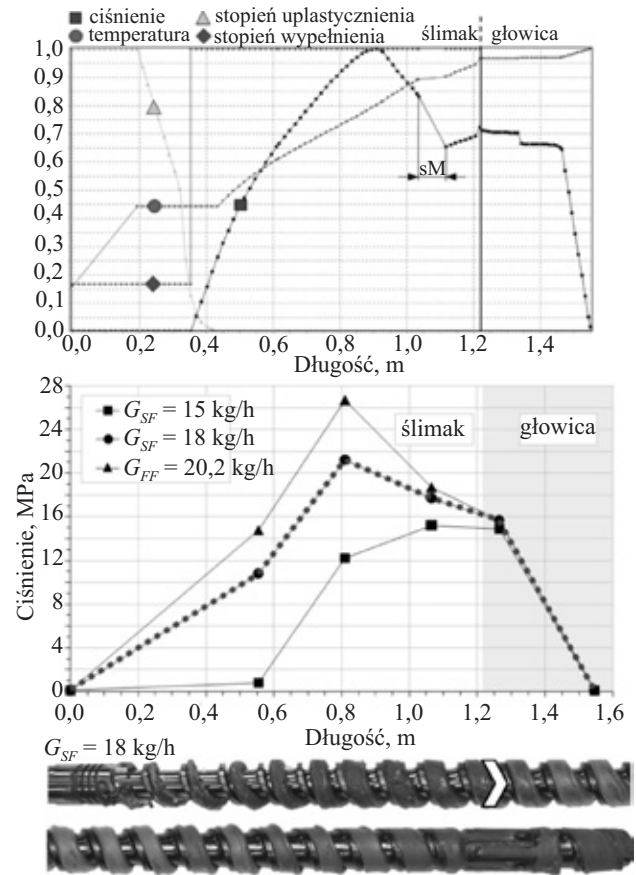
W badaniach wykorzystano wytłaczarkę Metalchem T-45 wyposażoną w dozownik ślimakowy. Zastosowano ślimak z sekcją intensywnego ścinania typu Maddock (rys. 1) oraz głowicę do wytłaczania prętów o średnicy  $d = 5 \text{ mm}$ . Metodykę badań opisano w pracy [12].

Pręty wytłaczano w procesie z tradycyjnym, grawita-



Rys. 2. Przebieg wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS (sM – sekcja Maddocka):  $N = 50 \text{ obr/min}$ , zasilenie dozowane  $G_{SF} = 15 \text{ kg/h}$  (strzałka wskazuje początek wypełnienia ślimaka)

Fig. 2. Extrusion of PE-LD/PS (sM – Maddock section):  $N = 50 \text{ rpm}$ , feed rate  $G_{SF} = 15 \text{ kg/h}$  (an arrow shows the beginning of the fully filled screw region)



Rys. 3. Przebieg wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS (sM – sekcja Maddocka):  $N = 50 \text{ obr/min}$ , zasilenie dozowane  $G_{SF} = 18 \text{ kg/h}$  (strzałka wskazuje początek wypełnienia ślimaka)

Fig. 3. Extrusion of PE-LD/PS (sM – Maddock section):  $N = 50 \text{ rpm}$ , feed rate  $G_{SF} = 18 \text{ kg/h}$  (an arrow shows the beginning of the fully filled screw region)

cyjnym zasilaniem wylączarki oraz z zasilaniem dozowanym, z prędkością obrotową ślimaka  $N = 20, 50$  oraz  $80$  obr/min. Ustalono następujące wartości temperatury w kolejnych strefach wylączarki:  $T_I = 170$  °C,  $T_{II} = 180$  °C,  $T_{III} = 180$  °C,  $T_{IV} = 180$  °C,  $T_G = 180$  °C.

Lepkość mieszaniny wyznaczano na podstawie wyników badań własnych [12], zgodnie z równaniem Kleina:

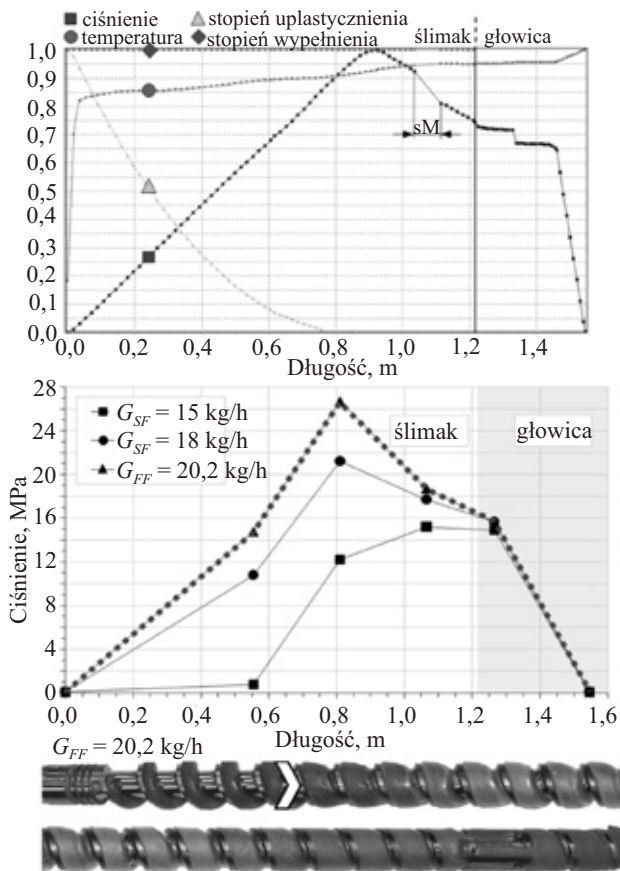
$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_{11} \ln^2 \dot{\gamma} + A_{12} T \ln \dot{\gamma} + A_2 T + A_{22} T^2 \quad (1)$$

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

Pozostałe dane materiałowe zaczerpnięto z literatury [4, 30].

## WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wpływ natężenia przepływu na przebieg wytłaczania z prędkością obrotową ślimaka  $N = 50$  obr/min i dwoma poziomami natężenia dozowania:  $G_{SF} = 15$  kg/h i  $G_{SF} = 18$  kg/h przedstawiają rys. 2–5. W procesie wytłaczania tradycyjnego wydajność wynosiła 20,2 kg/h.

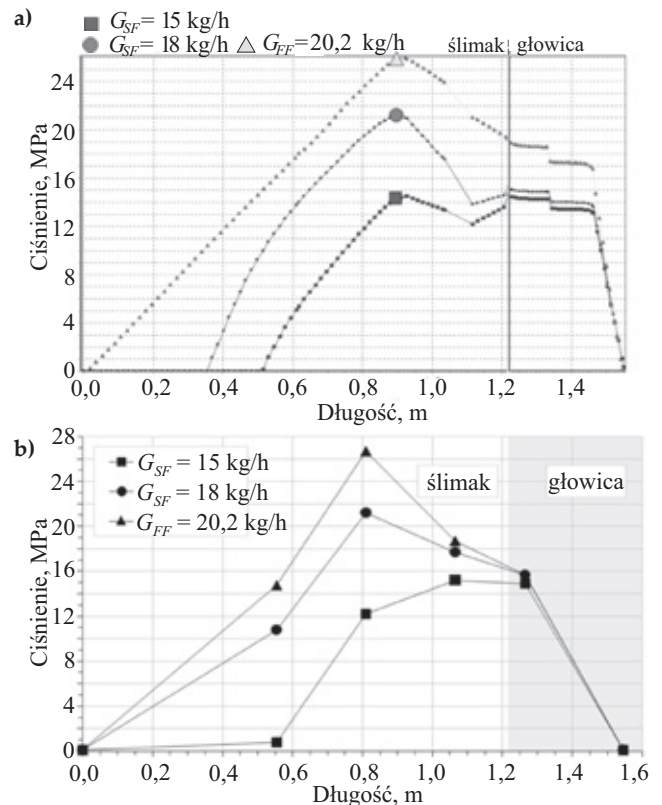


Rys. 4. Przebieg wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS (sM – sekcja Maddocka):  $N = 50$  obr/min, zasilanie grawitacyjne  $G_{FF} = 20,2$  kg/h (strzałka wskazuje początek wypełnienia ślimaka)

Fig. 4. Extrusion of PE-LD/PS (sM – Maddock section):  $N = 50$  rpm, flood feeding  $G_{FF} = 20.2$  kg/h (an arrow shows the beginning of the fully filled screw region)

Wyniki obliczeń mają postać bezwymiarową, obejmują rozkład ciśnienia i temperatury tworzywa, profil stopnia uplastycznienia tworzywa i stopnia wypełnienia ślimaka. Zmiany parametrów procesu w przestrzeni elementu Maddocka przedstawiono w sposób liniowy. Stopień uplastycznienia to stosunek objętości tworzywa w stanie stałym do całkowitej objętości tworzywa w danej przestrzeni obliczeń, natomiast stopień wypełnienia ślimaka to stosunek objętości tworzywa w danej przestrzeni do objętości tej przestrzeni, oceniany na podstawie długości obszaru całkowicie wypełnionego tworzywem. Początek tego obszaru, odpowiadający stopniowi wypełnienia równemu jedności, oznaczono strzałką. Wypełnienie ślimaka zwiększa się ze wzrostem natężenia przepływu. Przewidywany stopień wypełnienia ślimaka był przeszacowany w porównaniu z wartością doświadczalną, przy natężeniu przepływu 15 kg/h o ok. 20 %, natomiast przy natężeniu 18 kg/h – o ok. 10 %.

Przebieg uplastycznienia oceniano na podstawie długości obszaru uplastycznienia tworzywa. Wyniki symulacji uplastycznienia były zgodne z wynikami doświadczalnymi, w wypadku wytłaczania z dozowanym zasilaniem obserwowano szybsze uplastycznienie niż w wytłaczaniu tradycyjnym.



Rys. 5. Wyniki symulacji i pomiaru ciśnienia podczas wytłaczania mieszaniny PE-LD/PS:  $N = 50$  obr/min, zasilanie dozowane  $G_{SF} = 15$  kg/h,  $G_{SF} = 18$  kg/h oraz zasilanie grawitacyjne  $G_{FF} = 20,2$  kg/h: a) wyniki obliczeń, b) wyniki pomiarów

Fig. 5. Validation for pressure computations for extrusion of PE-LD/PS at  $N = 50$  rpm, feed rates  $G_{SF} = 15$  kg/h,  $G_{SF} = 18$  kg/h and flood feeding  $G_{FF} = 20.2$  kg/h: a) computation, b) experimental

W procesie wytłaczania z natężeniem  $G_{SF} = 15$  kg/h (rys. 2), materiał ogrzewano do temperatury topnienia (stopień uplastycznienia równy jedności). Po jej osiągnięciu rozpoczynało się uplastycznianie (wg pierwszego mechanizmu) i stopień uplastycznienia zmniejszał się do zera w warunkach całkowitego stopienia tworzywa. Uplastycznianie przebiegało stosunkowo szybko. Obliczona długość obszaru uplastycznienia różniła się od wartości uzyskanej doświadczalnie o ok. 10 %.

W wypadku wytłaczania z natężeniem  $G_{SF} = 18$  kg/h (rys. 3) dominował pierwszy mechanizm uplastycznienia, ale obszar odpowiadający ogrzewaniu do temperatury topnienia tworzywa był dłuższy, gdyż większe było natężenie przepływu. W temperaturze topnienia rozpoczynało się uplastycznianie, równie szybko jak poprzednio. W końcowej fazie stapiania, gdy kanał ślimaka wypełnił się tworzywem, ujawnił się drugi mechanizm uplastycznienia. Obliczona długość obszaru uplastycznienia różniła się o ok. 10 % od długości wyznaczonej doświadczalnie.

Przebieg uplastycznienia podczas wytłaczania tradycyjnego (rys. 4) był odmienny, ale zgodny z naszymi doświadczeniami. Stopień uplastycznienia w tym wypadku definiuje stosunek szerokości warstwy stałej tworzywa do szerokości kanału ślimaka. Uplastycznianie rozpoczynało się wówczas, gdy temperatura cylindra przewyższała temperaturę topnienia tworzywa, a stopień uplastycznienia na końcu strefy sprężania stopniowo zmniejszał się do zera. Uplastycznianie skończyło się wyraźnie dalej niż w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem.

Weryfikację obliczeń rozkładu ciśnienia przedstawia rys. 5. Ciśnienie jest generowane tylko w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka. Symulowany profil ciśnienia jest zgodny z profilem wyznaczonym doświadczalnie, zarówno w odniesieniu do wytłaczania z dozowanym zasilaniem, jak i wytłaczania tradycyjnego. Niedokładności pojawiają się w obszarze elementu Maddocka. Ciśnienie zwiększa się z natężeniem przepływu. Największe wartości ciśnienia uzyskano podczas wytłaczania tradycyjnego. Niewielkie zmniejszenie natężenia przepływu, z  $G_{FF} = 20,2$  kg/h (wytłaczanie tradycyjne) na  $G_{SF} = 18$  kg/h (wytłaczanie z dozowanym zasilaniem), czyli o ok. 10 %, powoduje istotne zmniejszenie ciśnienia w wytłaczarce o ok. 20 %, co skutkuje mniejszym zużyciem energii.

## PODSUMOWANIE

Wykonano badania symulacyjno-doświadczalne wytłaczania jednoślindakowego z dozowanym zasilaniem mieszaniny polimerów PE-LD/PS, z zastosowaniem ślimaków niekonwencjonalnych typu ścinającego.

Stwierdzono, że uplastycznianie mieszaniny w procesie wytłaczania z dozowanym zasilaniem przebiega szybciej i odmiennie niż w procesie z zasilaniem grawitacyjnym. Obszar uplastycznienia zwiększa się z natężeniem przepływu. Ślimak wypełnia się tworzy-

wem całkowicie tylko w końcowej części wytłaczarki, a obszar całkowitego wypełnienia ślimaka zwiększa się wraz z natężeniem przepływu. Ciśnienie jest generowane jedynie w obszarze całkowitego wypełnienia ślimaka i również się zwiększa wraz z natężeniem przepływu. Zgodność obliczeń z wynikami badań doświadczalnych jest zadowalająca, mimo stosunkowo prostego modelu przepływu w elemencie Maddocka.

## LITERATURA

- [1] Rauwendaal Ch.: "Polymer Extrusion", Hanser Publ., Munich 2013.
- [2] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 1258. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.23076>
- [3] Tadmor Z., Klein I.: "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Van Nostrand Reinhold, New York 1970.
- [4] Acur E.E., Vlachopoulos J.: *Polymer Engineering and Science* **1982**, 22, 1084. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760221706>
- [5] Potente H., Hanhart W., Schoppner V.: *International Polymer Processing* **1993**, 8, 335. <http://dx.doi.org/10.3139/217930335>
- [6] 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)
- [7] Altinkaynak A., Gupta M., Spalding M.A., Crabtree S.L.: *International Polymer Processing* **2011**, 26, 182. <http://dx.doi.org/10.3139/217.2419>
- [8] Lopez-Latorre L., McKelvey J.M.: *Advances in Polymer Technology* **1984**, 3, 355. <http://dx.doi.org/10.1002/adv.1984.060030404>
- [9] Isherwood D.P., Pieris R.N., Kassatly J.: *Transactions ASME* **1984**, 106, 132.
- [10] 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)
- [11] Thompson M.R., Donoian G., Christiano J.P.: *Polymer Engineering and Science* **2000**, 40, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11334>
- [12] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2015**, 60, 199. <http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.199>
- [13] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2016**, 61, 279.
- [14] Huneault M.A., Shi Z.H., Utracki L.A.: *Polymer Engineering and Science* **1995**, 35, 115. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.760350114>
- [15] Delamare L., Vergnes B.: *Polymer Engineering and Science* **1996**, 36, 1685. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.10565>
- [16] Lee S.H., White J.L.: *International Polymer Processing* **1998**, 13, 247. <http://dx.doi.org/10.3139/217980247>
- [17] Potente H., Bastian M.: *Polymer Engineering and Science* **2000**, 40, 727. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.11202>

- [18] Potente H., Bastian M., Flecke J., Schramm D.: *International Polymer Processing* **2001**, 16, 131.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.1633>
- [19] Wilczynski K., Jiang Q., White J.L.: *International Polymer Processing* **2007**, 22, 198.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2001>
- [20] Wilczyński K., White J.L.: *Polimery* **2008**, 53, 754.
- [21] Wilczyński K., Lewandowski A.: *Polimery* **2010**, 55, 883.
- [22] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
- [23] 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)
- [24] Domingues N., Gaspar-Cunha A., Covas J.A.: *Polymer Engineering and Science* **2010**, 50, 2194.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.21756>
- [25] Ariffin A., Ahmad M.S.B.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2011**, 50, 395.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.543228>
- [26] Wilczyński K., Nastaj A., Wilczyński K.J.: *International Polymer Processing* **2013**, 28, 34.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2640>
- [27] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [28] Wilczyński K.: *Polimery* **1997**, 42, 706.
- [29] Wilczyński K., Tyszkiewicz A.: *Polimery* **1996**, 41, 107.
- [30] Michaeli W.: "Extrusion Dies for Plastics and Rubber", Hanser Publ., Munich 2003.

Otrzymano 21 VIII 2015 r.