

Rheological fundamentals for extrusion of wood plastics composites

Podstawy reologiczne wytłaczania polimerowych kompozytów drzewnych



Rheometric studies of a polypropylene-based wood plastic composite were performed and its rheological characteristics were developed by determining the parameters of the Klein and Ostwald-de Waele equations. Simulation studies of the extrusion process were performed to evaluate the applied rheological models. Good results for modeling the extrusion process were obtained by using a relatively simple Ostwald-de Waele rheological model. For this model, the available material databases provide much more data than for the Klein model.

Keywords: rheological properties, modeling, wood plastic composites

Wykonano badania reometryczne polimerowego kompozytu drzewnego na osnowie polipropylenu (PP) oraz opracowano jego charakterystyki reologiczne, wyznaczając parametry równania Kleina i równania Ostwalda i de Waele'a. Wykonano badania symulacyjne procesu wytłaczania celem dokonania oceny zastosowanych modeli reologicznych. Stwierdzono, że można uzyskać dobre wyniki modelowania procesu wytłaczania przy zastosowaniu stosunkowo prostego modelu reologicznego Ostwalda i de Waele'a. W przypadku tego modelu dostępne bazy materiałowe dostarczają znacznie więcej danych, niż w przypadku modelu Kleina.

Słowa kluczowe: właściwości reologiczne, modelowanie, polimerowe kompozyty drzewne

Wytłaczanie jest podstawową techniką przetwórstwa tworzyw polimerowych. Polega na ciągłym uplastycznianiu tworzywa w układzie uplastyczniającym wytłaczarki i następnie wytłaczaniu uplastycznionego tworzywa przez otwory narzędzia formującego, zwanego głowicą. W procesie wytłaczania produkuje się różnego rodzaju profile, np. rury, pręty, folie, zwykle z tworzyw termoplastycznych i elastomerowych. Jednak w ostatnich latach w wyniku dynamicznego rozwoju inżynierii materiałowej znaczenia nabiera wytłaczanie materiałów zaawansowanych, wśród których wyróżniają się polimerowe kompozyty drzewne WPC (*wood plastic composites*). Te kompozyty znajdują szerokie zastosowanie w gospodarce, zastępując drewno. Są odporne na działanie warunków atmosferycznych. Podstawowe znaczenie mają kompozyty na osnowie polipropylenu, polietylenu dużej gęstości i poli(chlork winylu).

Stan wiedzy w zakresie przetwórstwa kompozytów drzewnych jest stosunkowo niewielki. Podstawowe znaczenie w literaturze przedmiotu mają monografie^{1, 2)}.

Ze względu na rozległe zastosowania kompozytów WPC w gospodarce w postaci wyrobów profilowych podstawową technologią ich przetwórstwa jest wytłaczanie. Wiedza w tym zakresie jest również ograniczona³⁻⁶⁾. Dopiero niedawno, na podstawie intensywnych badań doświadczalnych⁷⁾, opracowano komputerowy model wytłaczania polimerowych kompozytów drzewnych^{8, 9)}.

Projektowanie wytłaczania jest obecnie realizowane przy zastosowaniu systemów komputerowego modelowania tego procesu. Podstawę dobrego projektowania i efektywnego przetwórstwa stanowi znajomość właściwości przetwórczych stosowanych materiałów, wśród których właściwości reologiczne mają znaczenie podstawowe. Tradycyjne tworzywa polimerowe są stosunkowo dobrze poznane, a ich dane materiałowe są zwykle dostępne w materiałowych bazach danych, natomiast w przypadku materiałów zaawansowanych takich danych brakuje.

W pracy podjęto zagadnienie modelowania procesu wytłaczania jednoślindakowego kompozytów drzewnych na podstawie systemu SSEM (*single screw extrusion model*)¹⁰⁾. Podstawę takiego modelowania stanowi odpowiednia charakterystyka reologiczna przetwarzanego materiału, którą opracowano, wykorzystując badania reometryczne.

Modelowanie procesu wytłaczania jest zwykle wykonywane na podstawie modelu Kleina^{10, 11)}, który można opisać zależnością (1):



Dr inż. Kamila BUZIAK (ORCID:0000-0003-0595-4068) w roku 2013 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii Produkcji (obecnie Wydział Mechaniczny Technologiczny) Politechniki Warszawskiej. Jest adiunktem w Instytucie Technik Wytwarzania tej samej uczelni. Specjalność – przetwórstwo tworzyw sztucznych i reometria.

* Adres do korespondencji:

Instytut Technik Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: kamila.buziak@pw.edu.pl

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

w której η oznacza lepkość, $\dot{\gamma}$ szybkość ścinania, T temperaturę, a A_0 , A_1 , A_{11} , A_{12} , A_2 i A_{22} oznaczają parametry równania Kleina.

W bazach materiałowych brakuje jednak parametrów tego modelu, zarówno dla tworzyw tradycyjnych, jak i zaawansowanych. Znacznie więcej danych można znaleźć dla modelu potęgowego Ostwalda i de Waele'a (2):

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

w którym m i n oznaczają parametry równania: m współczynnik konsystencji, a n wykładnik płynięcia. Dlatego też rozwinięto system SSEM^{10, 11} w zakresie dostępnych modeli reologicznych, w tym modelu potęgowego.

W pracy wykonano badania reometryczne kompozytu drzewnego na osnowie polipropylenu (PP), opracowano jego charakterystyki reologiczne, wyznaczając parametry równania Kleina i równania Ostwalda i de Waele'a oraz wykonano badania symulacyjne procesu wytłaczania celem dokonania oceny zastosowanych modeli reologicznych.

Część doświadczalna

Materiały

Stosowano dwa kompozyty drzewne na osnowie polipropylenu (PP), różniące się zawartością włókien celulozowych. Do badań wykorzystano kompozyty firmy UPM Biocomposites (Lahti, Finlandia): UPM Formi EXP 40 oraz UPM Formi GP 20, zawierające odpowiednio 40% i 20% włókien celulozowych.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono za pomocą wysokociśnieniowego reometru kapilarnego RG-25 firmy Göttfert (Buchen, Niemcy), działającego na zasadzie stałej szybkości ścinania.

Wyznaczono krzywe płynięcia oraz krzywe lepkości dla kompozytów o zawartości 40% i 20% włókien celulozowych. Stosowano dwie kapilary o średnicy $D = 1$ mm oraz długości $L = 0,2$ i 10 mm, co odpowiada stosunkom L/D wynoszącym odpowiednio 0,2 i 10. Pomiary wykonano w temp. 180, 190 i 200°C, w zakresie szybkości ścinania $\dot{\gamma} = 10\text{--}5 \cdot 10^3$ 1/s. Wyniki pomiarów skorygowano poprawkami Rabinowitscha (ze względu na nienewtonowski charakter przepływu) i Bagleya (ze względu na straty wlotowe w reometrii kapilarnej).

Badania symulacyjne

W badaniach zastosowano klasyczny ślimak o średnicy $D = 45$ mm oraz stosunku długości do średnicy $L/D = 27$. Długość poszczególnych stref ślimaka wynosiła: strefa zasilania $L_F = 485$ mm, strefa sprężania $L_C = 320$ mm, strefa dozowania $L_M = 410$ mm, co daje całkowitą długość ślimaka $L = 1215$ mm. Głębokość kanału ślimaka w poszcze-

gólnych strefach wynosiła: w strefie zasilania $H_F = 8$ mm oraz w strefie dozowania $H_M = 3$ mm. Stopień sprężania, zdefiniowany jako stosunek głębokości kanału w strefie zasilania do głębokości kanału w strefie dozowania, wynosił $CR = H_F/H_M = 2,66$. Skok ślimaka był równy jego średnicy, czyli $t = D$, co oznacza, że kąt nachylenia linii śrubowej wynosił $\varphi = 17,65^\circ$. Szerokość zwoju ślimaka wynosiła $e = 5$ mm. Zastosowano głowicę do wytłaczania profili płaskich o szerokości $W = 20$ mm i wysokości $H = 2$ mm. Symulacje przeprowadzono dla różnej prędkości obrotowej ślimaka: $N = 30, 50$ i 70 rpm. Temperatura w poszczególnych strefach wytłaczarki oraz w głowicy wynosiła: $T_I = 160^\circ\text{C}$, $T_{II} = 175^\circ\text{C}$, $T_{III} = 180^\circ\text{C}$, $T_{IV} = 180^\circ\text{C}$ oraz $T_G = 180^\circ\text{C}$.

Do opisu lepkości zastosowano równanie reologiczne Kleina (1) oraz równanie potęgowe Ostwalda i de Waele'a (2).

Uzyskano następujące wartości parametrów równania Kleina: (i) dla kompozytu WF/PP 20/80: $A_0 = 23,87537563$, $A_1 = -0,823465539$, $A_{11} = -0,024270093$, $A_{12} = 0,002568648$, $A_2 = -0,139503726$ i $A_{22} = 0,000291882$; (ii) dla kompozytu WF/PP 40/60: $A_0 = 2,43718442$, $A_1 = -0,48464876$, $A_{11} = -0,02691078$, $A_{12} = 0,000925496$, $A_2 = 0,077631745$ i $A_{22} = -0,000245327$.

Wpływ temperatury na lepkość w modelu Ostwalda i de Waele'a uwzględniono przez związek (3):

$$m(T) = m_r \exp[-b(T - T_r)] \quad (3)$$

w którym m_r oznacza stałą konsystencji w temperaturze odniesienia T_r .

Uzyskano następujące wartości parametrów równania potęgowego Ostwalda i de Waele'a (dla temperatury odniesienia $T_r = 190^\circ\text{C}$): (i) dla kompozytu WF/PP 20/80: $m_r = 6724,7$, $n = 0,357$, $b = 0,0298$; (ii) dla kompozytu WF/PP 40/60: $m_r = 12288$, $n = 0,339$, $b = 0,0157$.

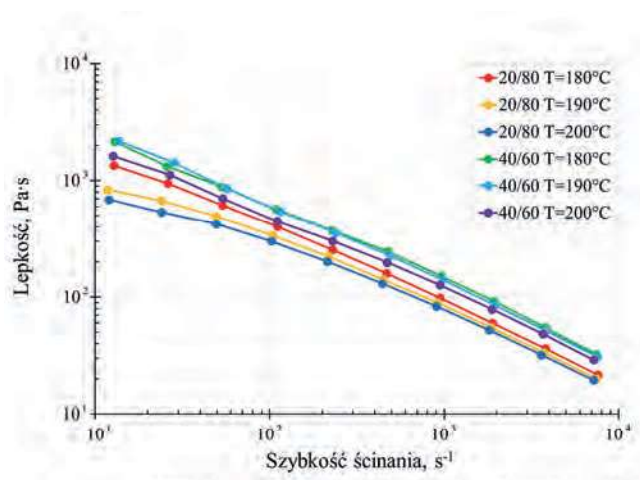


Fig. 1. Viscosity curves of WPC composites WF/PP 20/80 and WF/PP 40/60

Rys. 1. Krzywe lepkości polimerowych kompozytów drzewnych WF/PP 20/80 i WF/PP 40/60

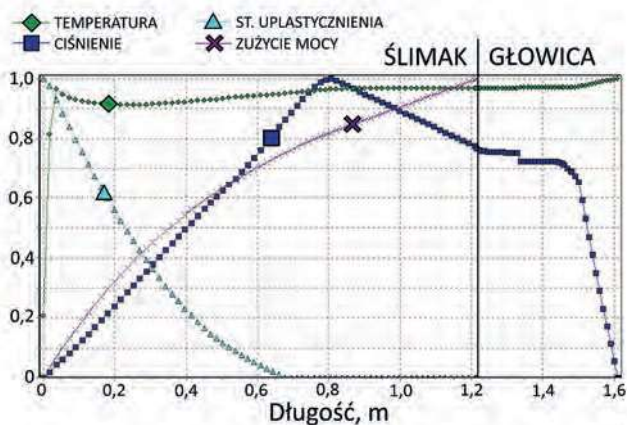


Fig. 2. Overall extrusion characteristics (Klein model) of WF/PP 20/80, $N=50$ rpm

Rys. 2. Charakterystyka ogólna wytłaczania (model Kleina) dla WF/PP 20/80, $N=50$ rpm

Wyniki badań i ich omówienie

Krzywe lepkości kompozytów drzewnych przedstawiono na rys. 1. Badania reologiczne potwierdziły nienewtonowski, pseudoplastyczny charakter badanych materiałów. Wraz ze wzrostem temperatury zauważono spadek lepkości, co jest typowe dla takich kompozytów. Dodatkowo zaobserwowano, że wraz ze wzrostem zawartości napełniacza drzewnego (włókien celulozowych) lepkość kompozytów wzrastała.

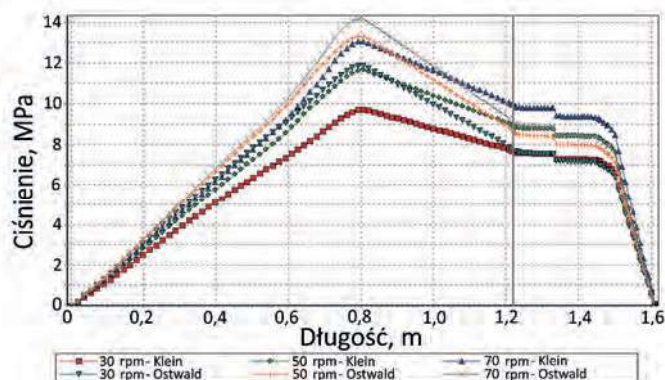


Fig. 3. Pressure profile (Klein model and Ostwald-de Waele model) of WF/PP 20/80

Rys. 3. Profil ciśnienia (model Kleina oraz Ostwalda i de Waele'a) dla WF/PP 20/80

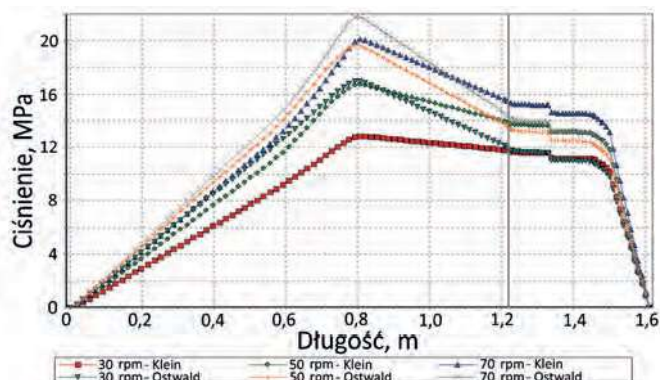


Fig. 4. Pressure profile (Klein model and Ostwald-de Waele model) of WF/PP 40/60

Rys. 4. Profil ciśnienia (model Kleina oraz Ostwalda i de Waele'a) dla WF/PP 40/60

Wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rys. 2–4. Ogólna charakterystyka procesu wytłaczania została przedstawiona na rys. 2, w odniesieniu do kompozytu WF/PP 20/80, gdzie zilustrowano takie parametry, jak ciśnienie, temperatura, zawartość fazy stałej oraz zużycie energii. Podobną charakterystykę uzyskano w odniesieniu do kompozytu WF/PP 40/60.

Podstawowe znaczenie dla tej pracy mają wyniki przedstawione na rys. 3 i 4. Rozkład ciśnienia jest bowiem najtrudniejszym do modelowania i przewidywania elementem projektowania procesu wytłaczania. Zgodnie z oczekiwaniami wraz ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka ciśnienie w wytłaczarnie wzrastało.

Uzyskane wyniki są charakterystyczne dla zastosowanego klasycznego ślimaka trójstrefowego i głowicy do profili płaskich. Zbieżność profilu ciśnienia uzyskanego w wyniku obliczeń wg modelu Kleina i modelu Ostwalda i de Waele'a, zarówno w układzie uplastyczniającym, jak i głowicy wskazuje, że można dobrze modelować proces wytłaczania przy zastosowaniu stosunkowo prostego modelu reologicznego Ostwalda de Waele'a.

Podsumowanie

Otrzymano dobre wyniki modelowania procesu wytłaczania za pomocą stosunkowo prostego modelu reologicznego Ostwalda i de Waele'a. W przypadku tego modelu dostępne bazy materiałowe dostarczają znacznie więcej danych niż w przypadku modelu Kleina. Otwarty pozostaje jednak problem danych materiałowych zaawansowanych materiałów polimerowych, np. kompozytów drzewnych, w odniesieniu do których danych brakuje. Dlatego niezbędne są dalsze prace w tym zakresie. Niezbędna jest też weryfikacja doświadczalna modelowania przy zastosowaniu diskutowanych modeli, co ważne, w zakresie warunków szybkości ścinania i temperatury właściwych warunkom procesu wytłaczania.

Otrzymano: 03-10-2024

Zrecenzowano: 18-11-2024

Zaakceptowano: 22-11-2024

Opublikowano: 20-12-2024

LITERATURA

- [1] K. Oksman Niska, M. Sain, *Wood-polymer composites*, Woodhead Publishing Ltd., Abington Hall, Cambridge 2008.
- [2] A.A. Klyosov, *Wood-plastic Composites*, Interscience Publishers, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey 2007.
- [3] T.Q. Li, M.P. Wolcott, *Polym. Eng. Sci.* 2005, **45**, 549, <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20308>.
- [4] K. Xiao, C. Tzoganakis, *Annu. Tech. Conf. – ANTEC Conf.* 2002, **38**, 252.
- [5] K. Xiao, C. Tzoganakis, *Annu. Tech. Conf. – ANTEC Conf.* 2003, **39**, 197.
- [6] K. Xiao, C. Tzoganakis, *Annu. Tech. Conf. – ANTEC Conf.* 2004, **40**, 448.
- [7] K. Wilczyński, A. Nastaj, A. Lewandowski, K.J. Wilczyński, K. Buziak, *Int. Polym. Proc.* 2015, **30**, 113, DOI: <https://doi.org/10.3139/217.3007>.
- [8] K. Wilczyński, K. Buziak, K.J. Wilczyński, A. Lewandowski, A. Nastaj, *Polymers* 2018, **10**, 295, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10030295>.
- [9] K. Wilczyński, K. Buziak, A. Lewandowski, A. Nastaj, K.J. Wilczyński, *Polymers* 2021, **13**, 622, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13040622>.
- [10] K. Wilczyński, *Rheology in polymer processing. Modeling and simulations*, Carl Hanser Verlag, Munich 2021.
- [11] K. Wilczyński, A. Nastaj, A. Lewandowski, K.J. Wilczyński, K. Buziak, *Polymers* 2019, **11**, 2106, DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/polym11122106>.