

# Wyznaczanie krzywych lepkości polimerowych kompozytów drzewnych na podstawie ograniczonej liczby pomiarów reometrycznych

Krzysztof J. Wilczyński<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.3.5](https://doi.org/10.14314/polimery.2018.3.5)

**Streszczenie:** Wykonano badania reometryczne polimerowego kompozytu drzewnego (WPC) na osnowie polipropylenu (PP) z udziałem 50 % mas. mączki drzewnej. Przedstawiono procedury wyznaczania krzywych lepkości WPC na podstawie ograniczonej liczby pomiarów wskaźnika szybkości płynięcia (*MFR*), z zastosowaniem uniwersalnego równania Vinogradova-Malkina, dwuparametrowego równania potęgowego Ostwalda-de Waele oraz trójparametrowego równania logarytmicznego Kleina. Przeprowadzono badania plastometryczne WPC, na podstawie których wyznaczono krzywe lepkości. Stwierdzono, że proponowane rozwiązania mogą być przydatne w praktyce inżynierskiej do szybkiej oceny właściwości reologicznych polimerowych kompozytów drzewnych.

**Słowa kluczowe:** polimerowe kompozyty drzewne, lepkość, reometria.

## Determination of viscosity curves of wood polymer composites based on limited rheological measurements

**Abstract:** Rheological studies of wood polymer composite (WPC) with polypropylene (PP) matrix containing 50 wt % wood flour have been performed. Several procedures for determination of WPC viscosity curves with a limited number of melt flow rate (*MFR*) measurements using universal Vinogradov-Malkin, two-parameter Ostwald-de Waele power-law and three-parameter logarithmic Klein equations were presented. The plastometric tests of WPC were carried out to determine the viscosity curves. It has been stated that the discussed procedures can be useful in engineering practice to rapidly assess the rheological properties of wood polymer composites.

**Keywords:** wood polymer composites, viscosity, rheometry.

Polimerowe kompozyty drzewne (ang. WPC, *wood polymer composites*) znajdują szerokie zastosowanie w gospodarce, z powodzeniem zastępując drewno. Są odporne na działanie warunków atmosferycznych, zwłaszcza wilgoci. Znaczenie mają przede wszystkim kompozyty na osnowie polipropylenu (PP), polietylenu dużej gęstości (HDPE) i poli(chlorku winylu) (PVC) [1–4].

Poziom wiedzy z dziedziny przetwórstwa i reologii kompozytów drzewnych jest stosunkowo niski. Podstawowym źródłem w tym zakresie są monografie Oksmana i Saina [3], Klyosowa [4] oraz przeglądowe prace Li i Wolcotta, np. [5–7], prace Xiao i Tzoganakisa, np. [8–11] oraz prace Vlachopoulosa i Hristowa, np. [12–14].

Kompozyty drzewne to materiały nienewtonowskie, pseudoplastyczne. Ich lepkość zmniejsza się ze wzrostem szybkości ścinania i temperatury, natomiast rośnie ze zwiększającą się zawartością mączki drzewnej. Kompozyty drzewne mogą wykazywać granicę płynięcia

podczas przepływu oraz poślizg na ściankach kanału przepływu. Prędkość poślizgu zwiększa się wraz z szybkością ścinania, co może prowadzić do występowania przepływu tłokowego. Większy udział w kompozycie mączki drzewnej również sprzyja występowaniu przepływu tłokowego. Obszerny przegląd wiedzy dotyczącej reologii i przetwórstwa polimerowych kompozytów drzewnych przedstawiono ostatnio w pracy [15], a rozszerzono później w pracach [16, 17].

Właściwości reologiczne tworzyw polimerowych mają podstawowe znaczenie w ich przetwórstwie. Znajomość charakterystyki reologicznej danego materiału stanowi podstawę prawidłowego projektowania i prowadzenia procesów przetwórczych [18–20].

Dane materiałowe konwencjonalnych tworzyw polimerowych są zwykle dostępne w materiałowych bazach danych, np. Autodesk-Moldflow [21] i CAMPUS [22], ale nie zestawiono ich w bazie materiałowej m.in. programu Ansys-Polyflow [23, 24].

Najczęściej dostępne dane reologiczne są ograniczone do wartości wskaźnika szybkości płynięcia (*MFR*) lub wykresów lepkości, np. CAMPUS [22]. Baza Autodesk-

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technik Wytwarzania, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, e-mail: wilczyński\_k@wp.pl

-Moldflow [21] dodatkowo podaje parametry równań reologicznych, opisujących te właściwości.

Badania reologiczne są trudne, czasochłonne i kosztowne. Ponadto, jako badania laboratoryjne są prowadzone w termomechanicznych warunkach przepływu (temperatury, prędkości przepływu, ciśnienia, szybkości ścinania, naprężenia) często różniących się od warunków rzeczywistego procesu przetwórczego. Dlatego też poszukuje się metod uproszczonego wyznaczania właściwości reologicznych, realizowanych w warunkach procesu przetwórczego, *in-line* lub *on-line* [25–31].

Ostatnio autorzy [32] opracowali procedury obliczeniowe stosowane do wyznaczania krzywych lepkości tworzyw polimerowych w wybranym zakresie szybkości ścinania i temperatury na podstawie ograniczonej liczby pomiarów wskaźnika szybkości płynięcia.

W niniejszej pracy skupiono się na wyznaczaniu właściwości reologicznych polimerowych kompozytów drzewnych, gdyż ani w bazach materiałowych [21, 22], ani w literaturze przedmiotu, np. [3, 4, 33], danych reologicznych dotyczących WPC nie ma.

Znajomość właściwości reologicznych tworzyw, w tym kompozytów i mieszanin polimerowych, stanowi podstawę modelowania procesów przetwórstwa tych materiałów. Brak charakterystyki reologicznej stanowi poważne ograniczenie modelowania i praktycznego stosowania WPC w przemyśle [34, 35]. Wskazują na to m.in. badania autorów w zakresie modelowania wytłaczania polimerów i ich mieszanin [36–40] oraz wytłaczania polimerowych kompozytów drzewnych [15, 41, 42].

W pracy przeprowadzono badania reometryczne i plastometryczne kompozytu na osnowie polipropylenu (PP) o zawartości mączki drzewnej 50 % mas. Krzywe lepkości kompozytu wyznaczono na podstawie wartości wskaźnika szybkości płynięcia z zastosowaniem uniwersalnego równania Vinogradova-Malkina, dwuparametrowego równania potęgowego Ostwalda-de Waele oraz trójparametrowego równania logarytmicznego Kleina. W celu weryfikacji procedur porównano wyniki badań plastometrycznych z wynikami badań reometrycznych.

## KRZYWE LEPKOŚCI

Krzywe lepkości zwykle wyznacza się z zastosowaniem ciśnieniowych reometrów kapilarnych na podstawie wielu punktów pomiarowych w odpowiednio szerokim zakresie szybkości ścinania i temperatury. Wyniki pomiarów są aproksymowane za pomocą równań reologicznych, np. Kleina, Crossa-WLF, Birda-Carreau-Yasudy, Muenstedta [20], wykorzystywanych w modelowaniu procesów przetwórstwa tworzyw [18–20, 32, 35, 38]. W praktyce przemysłowej badania reometryczne można niekiedy zastąpić badaniami plastometrycznymi.

Wykonano badania reometryczne i plastometryczne kompozytu drzewnego WPC Beologic 50/50 PP copo inj 4 (firmy Beologic) na osnowie polipropylenu (PP) z udziałem 50 % mas. mączki drzewnej. Charakterystykę bada-

nego WPC przedstawiono w tabeli 1. Gęstość stopionego kompozytu ( $\rho_m = 0,996 \text{ g/cm}^3$ ) oraz wskaźnik szybkości płynięcia ( $MFR_{190^\circ\text{C}; 5,00 \text{ kg}} = 0,86 \text{ g/10 min}$ ) wyznaczono na podstawie wyników badań własnych. Gęstość stopionego tworzywa oznaczano w toku pomiaru wskaźnika szybkości płynięcia: masę zważonej próbki wypływającej dzielono przez jej objętość, odpowiadającą przesunięciu tłoka podczas badania.

**T a b e l a 1.** Charakterystyka materiałowa WPC Beologic 50/50 PP copo inj 4

**T a b l e 1.** Material characteristics of WPC Beologic 50/50 PP copo inj 4

Właściwość	Norma	Wartość
Gęstość w stanie stałym, g/cm <sup>3</sup>	Beologic	1,1–1,3
Gęstość nasypowa, g/cm <sup>3</sup>	Beologic	0,4–0,6
Moduł Younga, MPa	ISO 527-1, -2	4172,4
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	ISO 527-1, -2	47,0
Udarność (23 °C), kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/U/IJ	15,0

Badania reometryczne przeprowadzono z zastosowaniem ciśnieniowego reometru kapilarnego Rheograph 6000 firmy Goettfert, działającego na zasadzie stałej (nastawnej) szybkości ścinania, w temp. 190 °C i zakresie szybkości ścinania 4–1600 1/s. Wykorzystano trzy kapilary o średnicy  $d_k = 2 \text{ mm}$  i długości  $L_{k1} = 10 \text{ mm}$ ,  $L_{k2} = 20 \text{ mm}$  i  $L_{k3} = 30 \text{ mm}$  (o stosunku  $L_{k1}/d_k = 5$ ,  $L_{k2}/d_k = 10$ ,  $L_{k3}/d_k = 15$ ). Pomiary wykonano w 7 punktach każdej kapilary. Wyniki skorygowano poprawką Rabinowitscha i Bagleya.

Badania plastometryczne przeprowadzono za pomocą plastometru Melt Indexer MI-2 firmy Goettfert, działającego na zasadzie stałego naprężenia stycznego, w temp. 190 °C. Wykorzystano kapilarę znormalizowaną o średnicy  $d_k = 2,095 \text{ mm}$ , długości  $L_k = 8,0 \text{ mm}$  i stosunku  $L_k/d_k = 3,819$ . Średnica tłoka była równa  $d_t = 9,48 \text{ mm}$ , a średnica cylindra  $d_c = 9,555 \text{ mm}$ . Krzywą lepkości wyznaczono na podstawie 8 punktów pomiarowych, wynikających z zastosowanego obciążenia (3,8; 5,0; 8,7; 10,0; 12,5; 15,0; 21,6; 31,6 kg).

Krzywą lepkości wyznaczono według procedury przedstawionej w pracy [32], zgodnie z którą szybkość ścinania można wyrazić jako:

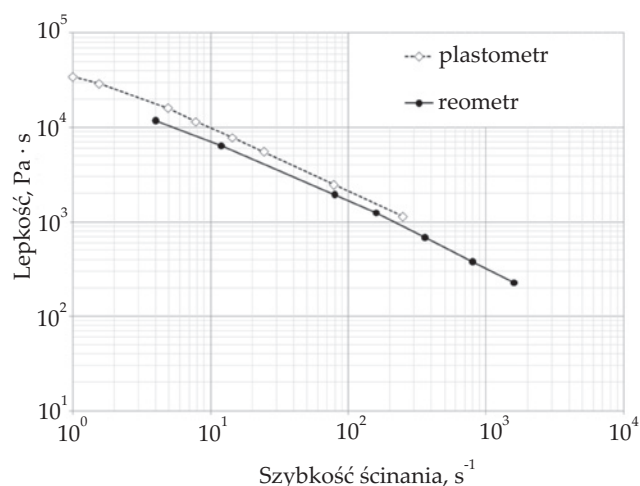
$$\dot{\gamma}_w = \frac{4 \cdot MFR}{\pi R_k^3 \cdot 600 Q_m} = 1,85 \cdot MFR / Q_m \quad (Q_m [\text{g/cm}^3]) [1/\text{s}] \quad (1)$$

a lepkość jako:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (2)$$

$$\eta = \frac{mgR_k^2 \cdot 4MFR}{2L_k S \cdot 600 \pi R_k^3 Q_m} = 4919 \frac{mQ_m}{MFR} \quad (Q_m [\text{g/cm}^3]) [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (3)$$

gdzie:  $\eta$  – lepkość,  $\tau_w$  – naprężenie styczne (na ścianie kapilary),  $\dot{\gamma}_w$  – szybkość ścinania (na ścianie kapilary),  $MFR$  – wskaźnik szybkości płynięcia,  $Q_m$  – gęstość w sta-



Rys. 1. Krzywa lepkości WPC Beologic 50/50 PP uzyskana na podstawie badań: plastometrycznych – linia przerywana, reometrycznych – linia ciągła

Fig. 1. Viscosity curves of WPC Beologic 50/50 PP: dotted line – graph based on the MFR measurements, solid line – graph based on the rheometer measurements

nie stopionym,  $R_k$  – promień kapilary,  $L_k$  – długość kapilary,  $m$  – obciążenie (masa tłoka i obciążnika),  $g$  – przyspieszenie ziemskie.

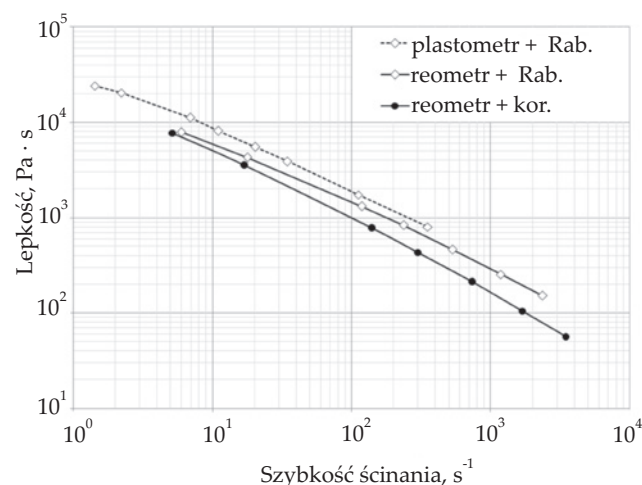
Wyniki pomiarów reometrycznych i plastometrycznych przedstawiają rys. 1–2. Rysunek 1 przedstawia wyniki nieuwzględniające korekt reometrycznych, a rys. 2 – z poprawkami Rabinowitscha i Bagleya.

Pomiary plastometryczne są obarczone błędem wpływającym na zwiększenie lepkości, wynikającym z zastosowania krótkiej kapilary, pominięcia poprawki Bagleya oraz nieuwzględnienia poprawki Rabinowitscha-Mooneya. Jednak otrzymane wyniki dobrze oddają charakter zależności lepkości od szybkości ścinania, a możliwy do uzyskania z typowym zestawem obciążników zakres szybkości ścinania 1,0–249,6 1/s w znacznym stopniu pokrywa się z zakresem szybkości ścinania występującym np. w procesie wytłaczania tworzyw. Obserwowane przesunięcie krzywych lepkości w kierunku większych wartości, w porównaniu z krzywymi wyznaczonymi w badaniach reometrycznych, potwierdzają dane firmy Goettfert [27]. Rozbieżności sięgały 30 %.

Należy rozważyć, że w prowadzonych badaniach nie uwzględniono możliwego poślizgu na ściankach kanału przepływu i granicy płynięcia. Wymienione zjawiska mogą prowadzić do występowania przepływu tłokowego, w wyniku którego obliczenia reometryczne trzeba odpowiednio modyfikować z zastosowaniem np. analizy Mooneya [20].

#### Wyznaczanie krzywej lepkości na podstawie metody jednopunktowej wg modelu Vinogradova-Malkina

W celu wyznaczenia krzywych lepkości na podstawie jednego punktu pomiarowego zastosowano uniwersalną krzywą lepkości definiowaną modelem Vinogradova-



Rys. 2. Krzywa lepkości WPC Beologic 50/50 PP uzyskana na podstawie badań: plastometrycznych z zastosowaniem poprawki Rabinowitscha – linia przerywana, reometrycznych z zastosowaniem poprawki Rabinowitscha i Bagleya – linia ciągła (●)

Fig. 2. Viscosity curve of WPC Beologic 50/50 PP: dotted line – graph based on the MFR measurements using Rabinowitsch correction, solid line (◇) – graph based on the rheometer measurements using Rabinowitsch correction, (●) – graph based on the rheometer measurements using Rabinowitsch and Bagley correction

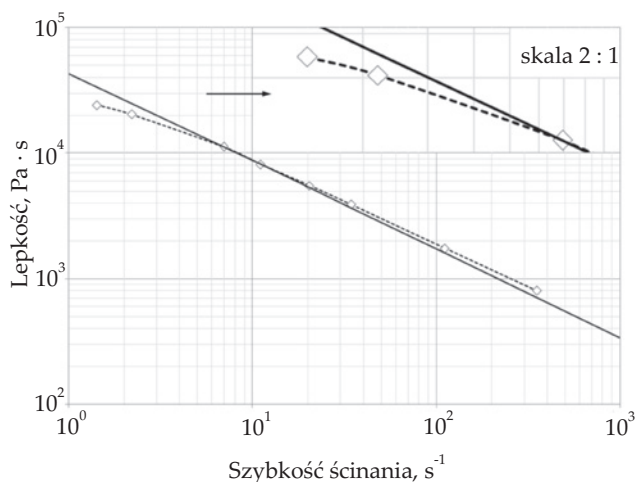
va-Malkina. Wykazali oni, że w odniesieniu do nienapełnionych tworzyw termoplastycznych prawdziwa jest zależność [29]:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + A_1 \cdot (\dot{\gamma} \cdot \eta_0)^\alpha + A_2 \cdot (\dot{\gamma} \cdot \eta_0)^{2\alpha}} \quad (4)$$

gdzie:  $\eta$  – lepkość przy szybkości ścinania  $\dot{\gamma}$  w temperaturze  $T$ ,  $\eta_0$  – lepkość przy zerowej szybkości ścinania ( $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ ) w temperaturze  $T$ ,  $\dot{\gamma}$  – szybkość ścinania,  $A_1, A_2, \alpha$  – parametry równania:  $A_1 = 1,386 \cdot 10^{-2}$ ,  $A_2 = 1,462 \cdot 10^{-3}$ ,  $\alpha = 0,355$ .

Na podstawie wyników pomiaru wskaźnika szybkości płynięcia obliczano szybkość ścinania i lepkość, wg wzorów (1)–(3), a następnie w procedurze iteracyjnej z równania (4) wyznaczano lepkość zerową  $\eta_0$ . Procedurę realizowano za pomocą Solvera programu MS Excel, po czym na podstawie równania (4) wyznaczano krzywą lepkości badanego kompozytu. Przedstawione na rys. 3 wyniki zestawiono z krzywą lepkości uzyskaną na podstawie ośmiu punktów pomiarowych.

Wyniki badań wskazują, że uniwersalna krzywa lepkości wyznaczona na podstawie jednego punktu pomiarowego stosunkowo dobrze opisuje tworzywa WPC o liniowej i płaskiej charakterystyce płynięcia (w układzie podwójnie logarytmicznym). Maksymalne różnice między krzywą lepkości określoną na podstawie badań plastometrycznych w pełnym zakresie szybkości ścinania a krzywą Vinogradova-Malkina wynoszą od ok. 10 % dla dużych szybkości ścinania, np. 11,8 % dla  $\dot{\gamma} = 354,0$  1/s, do ok. 30 % dla bardzo małych szybkości ścinania, np. 39,2 %



Rys. 3. Krzywa lepkości WPC Beologic 50/50 PP uzyskana na podstawie: badań plastometrycznych – linia przerywana, uniwersalnego modelu Vinogradova-Malkina – linia ciągła

Fig. 3. Viscosity curve of WPC Beologic 50/50 PP: dotted line – graph based on the MFR measurements, solid line – graph based on the Vinogradov-Malkin model

dla  $\dot{\gamma} = 1,4$  1/s. Stosowanie metody wyznaczania krzywej szybkości z wykorzystaniem badań plastometrycznych w praktyce przemysłowej procesów przetwórstwa kompozytów drzewnych może więc być dopuszczalne. Wielkość błędu będzie oczywiście zależna od rodzaju badanego kompozytu.

#### Wyznaczanie krzywej lepkości na podstawie metody dwupunktowej wg modelu Ostwalda-de Waele

Wyznaczenie krzywej lepkości na podstawie jednego punktu pomiarowego z wykorzystaniem uniwersalnych współczynników, bez dodatkowego, geometrycznego punktu definiującego tę krzywą, jest obciążone dużym błędem. Dokładniejsza jest metoda dwupunktowa, polegająca na aproksymacji liniowej (w układzie podwójnie logarytmicznym) wyników uzyskanych w dwóch punktach pomiarowych z zastosowaniem równania potęgowego Ostwalda-de Waele [20]:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

gdzie:  $k$  – stała konsystencji,  $n$  – wykładnik płynięcia.

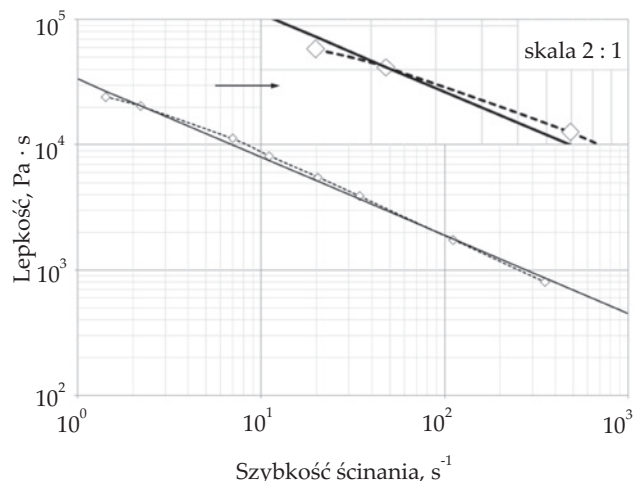
W celu wyznaczenia parametrów równania potęgowego, stałej konsystencji  $k$  i wykładnika płynięcia  $n$ , należy przeprowadzić dwa pomiary wskaźnika szybkości płynięcia, z zastosowaniem małego obciążenia tłka – *Low Load* ( $LL = 5,0$  kg), czyli małej szybkości ścinania, oraz dużego obciążenia tłka – *High Load* ( $HL = 21,6$  kg), czyli dużej szybkości ścinania.

W rezultacie, wykładnik płynięcia  $n$  i współczynnik konsystencji  $k$  wyrażają zależności:

$$n = \frac{\log m_{HL} - \log m_{LL}}{\log MFR_{HL} - \log MFR_{LL}} \quad (6)$$

$$k = \frac{\tau_{LL}}{\dot{\gamma}_{LL}^n} = \frac{\alpha \cdot m_{LL}}{(\beta \cdot MFR_{LL})^n} \quad (7)$$

Na podstawie wyników pomiaru MFR w dwóch punktach pomiarowych wyznaczono krzywą lepkości badanego kompozytu i zestawiono ją z krzywą lepkości uzyskaną na podstawie 8 punktów pomiarowych (rys. 4).



Rys. 4. Krzywa lepkości WPC Beologic 50/50 PP uzyskana na podstawie: badań plastometrycznych – linia przerywana, modelu potęgowego Ostwalda-de Waele – linia ciągła

Fig. 4. Viscosity curve of WPC Beologic 50/50 PP: dotted line – graph based on the MFR measurements, solid line – graph based on the Ostwald-de Waele power-law model

Model potęgowy dobrze opisuje dane doświadczalne, szczególnie w obrębie punktów pomiaru wskaźnika szybkości płynięcia. Różnice między krzywą lepkości uzyskaną na podstawie badań plastometrycznych w pełnym zakresie szybkości ścinania (krzywa odniesienia) a krzywą lepkości uzyskaną na podstawie modelu potęgowego Ostwalda-de Waele w punktach pomiaru MFR wynoszą jedynie 0,4 % dla obciążenia 5,0 kg ( $\dot{\gamma} = 2,2$  1/s) i 1,4 % dla obciążenia 21,6 kg ( $\dot{\gamma} = 111,5$  1/s). Poza punktami pomiaru MFR, różnice sięgają kilkunastu procent, np. 11,5 % dla obciążenia 3,8 kg ( $\dot{\gamma} = 1,4$  1/s).

Można stwierdzić, że model potęgowy opisuje uzyskane dane doświadczalne z zadowalającą dla zastosowań inżynierskich dokładnością, w ograniczonym zakresie szybkości ścinania.

#### Wyznaczanie krzywej lepkości na podstawie metody trójpunktowej wg modelu Kleina

Wyznaczanie krzywych lepkości na podstawie dwóch punktów pomiarowych jest wystarczająco dokładne dla podstawowych zastosowań inżynierskich, zwłaszcza w zakresie pomiarów MFR, jednak poza tym zakresem, jak również między punktami pomiarowymi, linia prosta (w układzie logarytmicznym) niezbyt dobrze opisuje badany kompozyt.

W celu zwiększenia dokładności aproksymacji zastosowano metodę trójpunktową, polegającą na wyznacza-

niu lepkości w trzech, możliwie równo od siebie oddalonych (w skali logarytmicznej) punktach pomiaru *MFR* (np. dla 5, 10 i 21,6 kg).

Uzyskane wyniki aproksymowano za pomocą odpowiednio zredukowanego równania Kleina, z którego usunięto człon określający wpływ temperatury [20]:

$$\ln \eta = A_0 + A_1 \ln \dot{\gamma} + A_{11} \ln^2 \dot{\gamma} \quad (8)$$

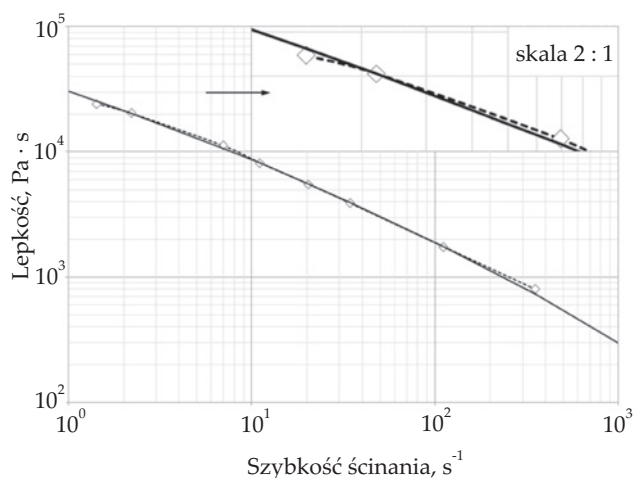
Równanie (8) zapisano w postaci równania kwadratowego:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (9)$$

gdzie:  $y = \ln \eta$ ,  $x = \ln \dot{\gamma}$ ,  $a = A_{11}$ ,  $b = A_1$ ,  $c = A_0$ .

Parametry równania Kleina ( $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_{11}$ ) wyznaczano na podstawie regresji liniowej z zastosowaniem tablicowej postaci funkcji statystycznej REGLINP programu MS Excel.

Taka krzywa bardzo dobrze opisuje dane doświadczalne w całym badanym zakresie szybkości ścinania. Różnice między krzywą lepkości odniesienia a krzywą Kleina uzyskaną na podstawie trzech punktów pomiaru *MFR* nie przekraczają średnio 3,0 % w całym zakresie szybkości ścinania (rys. 5).



Rys. 5. Krzywa lepkości WPC Beologic 50/50 PP uzyskana na podstawie: badań plastometrycznych – linia przerywana, modelu logarytmicznego Kleina – linia ciągła

Fig. 5. Viscosity curve of WPC Beologic 50/50 PP: dotted line – graph based on the *MFR* measurements, solid line – graph based on the Klein logarithmic model

Zastosowanie tej metody w istotnym stopniu ogranicza czasochłonność pomiarów, a ich dokładność dla zastosowań inżynierskich jest dostateczna.

#### PODSUMOWANIE

Przeprowadzono badania reometryczne i plastometryczne kompozytu drzewnego na osnowie polipropylenu z zawartością mączki drzewnej 50 % mas. Na

podstawie wyników pomiaru *MFR* kompozytu z zastosowaniem uniwersalnego równania Vinogradova-Malkina, dwuparametrowego równania potęgowego Ostwalda-de Waele lub trójparametrowego równania logarytmicznego Kleina wyznaczono krzywe lepkości badanego WPC. Porównano wyniki badań plastometrycznych z wynikami badań reometrycznych.

Stwierdzono, że proponowane rozwiązania mogą być przydatne w praktyce inżynierskiej do szybkiej oceny właściwości reologicznych przetwarzanych kompozytów polimerowo-drzewnych.

Błędy, jakimi są obarczone uzyskane wyniki, zależą od rodzaju badanego kompozytu, zakresu szybkości ścinania i temperatury prowadzonych badań.

Pełna analiza reologiczna przepływu polimerowych kompozytów drzewnych wymaga uwzględnienia możliwego poślizgu na ściankach kanału przepływu oraz granicy płynięcia, prowadzących do występowania przepływu tłokowego, co wymaga zasadniczej zmiany stosowanych procedur obliczeniowych.

Warto zauważyć, że wiele zagadnień reologicznych można rozwiązać z wykorzystaniem prostych i szybkich obliczeń inżynierskich, a ich dokładność często niewiele odbiega od dokładności obliczeń wykonywanych za pomocą zaawansowanych – trudnych, kosztownych i czasochłonnych – programów symulacyjnych, prowadzących niekiedy do błędnych wyników.

Należy pamiętać, że narzędzia obliczeniowe zawsze należy dobrać odpowiednio do skali trudności rozpatrywanego zagadnienia. Przy braku wiarygodnych danych, zwłaszcza materiałowych, wykorzystywanie zaawansowanych narzędzi obliczeniowych nie ma uzasadnienia.

Perspektywicznym celem prowadzonych badań jest opracowanie systemu obliczeń reologicznych, umożliwiającego łatwe i szybkie rozwiązywanie podstawowych zagadnień przetwórstwa tworzyw z dobrą, inżynierską dokładnością.

#### LITERATURA

- [1] Błędzki A.K., Reihmane S., Gassan J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1998**, 37, 451.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559808001373>
- [2] Zajchowski S., Ryszkowska J.: *Polimery* **2009**, 54, 674.
- [3] Oksman Niska K., Sain M.: "Wood-Polymer Composites", Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge 2008.
- [4] Klyosov A.A.: "Wood-Plastic Composites", Interscience Publishers, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey 2007.
- [5] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2005**, 45, 549.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20308>
- [6] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 114.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20432>

- [7] Li T.Q., Wolcott M.P.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 464.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20505>
- [8] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2002: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2002**, 38, 252.
- [9] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2003: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2003**, 39, 197.
- [10] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2003: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2003**, 39, 975.
- [11] Xiao K., Tzoganakis C.: *ANTEC 2004: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings* **2004**, 40, 448.
- [12] Hristov V., Takacs E., Vlachopoulos J.: *Polymer Engineering and Science* **2006**, 46, 1204.  
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.20592>
- [13] Vlachopoulos J., Hristov V.: "Rheology of Wood Polymer Composites", Proceedings of the Regional PPS Meeting, B1, Pretoria, RPA, 2006.
- [14] Santi R.C., Hage E.Jr, Vlachopoulos J., Correa C.A.: *International Polymer Processing* **2009**, 24, 346.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.2238>
- [15] Wilczyński K., Buziak K., Bartnik M.: *Polimery* **2016**, 61, 195.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.195>
- [16] Michalska-Požoga I., Rydzkowski T.: *Polimery* **2016**, 61, 202.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.202>
- [17] Lewandowski K., Piszczek K., Zajchowski S., Mirowski J.: *Polymer Testing* **2016**, 51, 58.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.02.004>
- [18] Rauwendaal Ch.: "Polymer Extrusion", Hanser Publ., Munich 2013.
- [19] Vlachopoulos J.: "Polymer Rheology and Extrusion", Polydynamics Inc., Ontario 2011.
- [20] Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
- [21] [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)
- [22] [www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com)
- [23] Wilczyński K., Tyszkiewicz A.: *Polimery* **1996**, 41, 107.
- [24] [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [25] Osswald T., Rudolph N.: "Polymer Rheology. Fundamentals and Applications", Hanser Publ., Munich 2015.
- [26] Shaw M.T.: "Introduction to Polymer Rheology", Wiley, Hoboken, New Jersey 2012.
- [27] Materiały firmy Goettfert 2016.
- [28] Vinogradov G.V., Malkin A.Ya.: *Journal of Polymer Science A-2* **1964**, 2, 2357.
- [29] Vinogradov G.V., Malkin A.Ya.: *Journal of Polymer Science A-2* **1966**, 4, 135.
- [30] Shenoy A.V.: "Rheology of Filled Polymer Systems", Springer Publ., Dordrecht 1999.
- [31] Kloziński A.: *Polimery* **2016**, 61, 788.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.788>
- [32] Wilczyński K.J.: *Polimery* **2017**, 62, 441.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.441>
- [33] Malkin A.Y., Isayev A.I.: "Rheology. Concepts, Methods, and Applications", ChemTec Publ., Toronto 2012.
- [34] Ariffin A., Ahmad M.S.B.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2011**, 50, 395.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.543228>
- [35] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2012**, 51, 626.  
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2012.659313>
- [36] Wilczyński K., Szymaniak Z., Tyszkiewicz A.: *Journal of Materials Processing Technology* **2001**, 109, 320.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00821-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00821-9)
- [37] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polimery* **2011**, 56, 45.
- [38] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2015**, 60, 199.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2015.199>
- [39] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2016**, 61, 279.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.279>
- [40] Wilczyński K.J., Nastaj A.: *Polimery* **2016**, 61, 357.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.357>
- [41] Wilczyński K., Nastaj A., Lewandowski A. i in.: *International Polymer Processing* **2015**, 30, 113.  
<http://dx.doi.org/10.3139/217.3007>
- [42] Wilczyński K.J., Buziak K.: *Polimery* **2017**, 62, 680.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2017.680>

Otrzymano 23 I 2017 r.