

Badanie przepływu kompozytów polimerowo-drzewnych w procesie wytłaczania jednoślیمakowego

Krzysztof Wilczyński^{1), *)}, Kamila Buziak¹⁾, Marta Bartnik¹⁾

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2016.195

Streszczenie: Zbadano doświadczalnie przepływ kompozytu polimerowo-drzewnego o zawartości 70 % mas. mączki drzewnej w procesie wytłaczania jednoślیمakowego, w różnych warunkach technologicznych przetwórstwa. Przebieg uplastyczniania i przepływu tworzywa oceniono na podstawie tzw. zimnego eksperymentu wytłaczania, z zastosowaniem techniki wyciągania ślیمaka. Na podstawie wyników badań zaproponowano mechanizm uplastyczniania jednokierunkowego. Stwierdzono, że modelowanie procesu wytłaczania kompozytów polimerowo-drzewnych wymaga odmiennego podejścia niż modelowanie wytłaczania tworzyw termoplastycznych.

Słowa kluczowe: wytłaczanie jednoślیمakowe, kompozyty polimerowo-drzewne, mechanizm uplastyczniania.

Study on the flow of wood-plastic composites in the single-screw extrusion process

Abstract: Experimental studies have been done on the flow of wood-polypropylene composite with 70 wt % wood flour loading under various processing conditions of single-screw extrusion. The plasticization and flow of the polymer were evaluated on the basis of so-called cold extrusion experiment using „Screw Pulling-out Technique”. It was stated that the flow of wood-plastic composites is essentially different from the flow of thermoplastics. The flow is accompanied by slipping at the barrel walls, screw and die surfaces, also it shows a yield stress. Melting of the composite with high wood-flour content does not proceed according to the well known Tadmor model. Based on the results of the investigations, one-dimensional model of melting has been proposed. It was stated that the modeling of wood-plastic composite extrusion process requires a different approach than that used to model the extrusion of thermoplastic polymers.

Keywords: single-screw extrusion, wood-plastic composites, melting mechanism.

W związku z dynamicznym rozwojem inżynierii materiałowej i wytwarzaniem nowych, zaawansowanych materiałów polimerowych, takich jak: mieszaniny polimerów czy kompozyty polimerowe, pojawia się potrzeba podjęcia badań w zakresie modelowania procesów przetwórczych takich materiałów. Przetwórstwo zaawansowanych materiałów polimerowych jest zasadniczo odmiennie od przetwórstwa tworzyw tradycyjnych. Różne też jest modelowanie, gdyż wymaga uwzględnienia odmienności zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów przetwórczych, obejmujących np. mechanizm transportu i uplastyczniania materiału, charakterystykę reologiczną tworzywa (występowanie granicy płynięcia, poślizgu itp.) czy kształtowanie się struktury materiału. Dotychczas na świecie nie prowadzono takich badań modelowych w odniesieniu do zaawansowanych materiałów polimerowych.

Niniejsza praca dotyczy przetwórstwa, a dokładniej wytłaczania jednego z ważniejszych rodzajów materiałów kompozytowych — polimerowych kompozytów drzewnych.

Polimerowe kompozyty drzewne (ang. WPC, *Wood Plastic Composites*) pojawiły się na rynku materiałów polimerowych w latach dziewięćdziesiątych. Obecnie znajdują one szerokie zastosowanie w gospodarce, np. w budownictwie, gdzie zastępują drewno. Główną zaletą polimerowych kompozytów drzewnych, w porównaniu z właściwościami drewna, jest ich odporność na działanie warunków atmosferycznych, zwłaszcza wilgoci. Podstawowe znaczenie mają kompozyty na osnowie polipropylenu (PP), polietylenu dużej gęstości (PE-HD) i poli(chloroku winylu) (PVC) [1–4].

Obecnie podstawową technologią przetwórstwa polimerowych kompozytów drzewnych, szeroko stosowanych w gospodarce w postaci wyrobów profilowych, jest wytłaczanie. Może być ono realizowane w wytłaczarkach jednoślیمakowych lub dwuślیمakowych o różnej konfiguracji geometrycznej ślیمaków i głowic. Stan wie-

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

^{*)} Autor do korespondencji; e-mail: k.wilczynski@wip.pw.pl

dzy dotyczącej procesu wyłaczania jest bardzo zróżnicowany, zależnie od metody wyłaczania, typu konfiguracji geometrycznej układów ślimakowych i głowic, a także rodzaju przetwarzanego tworzywa.

Proces wyłaczania kompozytów polimerowo-drzewnych różni się zasadniczo od procesu wyłaczania klasycznych materiałów polimerowych. Wynika to m.in. z odmiennych właściwości reologicznych tych wysoko napełnionych materiałów i niestabilnej charakterystyki cieplnej drewna.

Reologia i przetwórstwo polimerowych kompozytów drzewnych są jak dotąd stosunkowo słabo poznane. Można tu wskazać jedynie podstawowe i przeglądowe prace Li i Wolcotta [5–7], Xiao i Tzoganakisa [8–10], Vlachopoulou i Hristova [12–14], Zolfaghariego [15] i Oksmana [3].

Polimerowe kompozyty drzewne są materiałami nie-newtonowskimi, pseudoplastycznymi. Ich lepkość zmniejsza się ze wzrostem szybkości ścinania i temperatury. Właściwości reologiczne WPC zależą od składu kompozytu. Według dostępnych doniesień literaturowych, wraz ze wzrostem stopnia napełnienia drewnem zwiększa się ich lepkość w stanie uplastycznionym, natomiast sprężystość w stanie uplastycznionym się zmniejsza.

Kompozyty WPC wykazują granicę płynięcia podczas przepływu oraz poślizg na ściankach kanału przepływu [5, 8, 12]. Występowanie poślizgu ma podstawowe znaczenie dla charakteru przepływu tych materiałów. W celu wyznaczenia prędkości poślizgu można w tym przypadku zastosować analizę Mooneya [16]. Wyniki badań wskazują, że prędkość poślizgu zależy od zawartości napełniacza, czyli mączki drzewnej, oraz od szybkości ścinania. Ze wzrostem szybkości ścinania prędkość poślizgu się zwiększa, co prowadzi do przepływu tłokowego [12]. Zwiększenie zawartości mączki drzewnej również sprzyja występowaniu przepływu tłokowego [15].

W przypadku polimerowych kompozytów drzewnych występuje charakterystyczne zjawisko „rozdzierania powierzchni” zewnętrznej materiału (ang. *surface tearing*) i jej zniekształcanie przy wypływie z głowicy wyłaczarskiej, nawet w warunkach małej szybkości ścinania. W praktyce przemysłowej te niekorzystne zjawiska są eliminowane w wyniku chłodzenia głowicy wyłaczarskiej, dzięki czemu jest możliwe uzyskanie gładkiej powierzchni kompozytowych wyrobów profilowych. Zjawisko „rozdzierania powierzchni” może zanikać w warunkach większych szybkości ścinania i większej zawartości napełniacza drzewnego [12, 14].

Poprawne projektowanie procesu wyłaczania kompozytów polimerowo-drzewnych wymaga znajomości mechanizmu ich przepływu. Znane teorie wyłaczania nie dają podstaw do takiego projektowania i nie umożliwiają przewidywania przebiegu procesu przetwórczego, np. uplastyczniania materiału czy rozkładu ciśnienia i temperatury w wyłaczarce [9, 11].

Liczba pozycji literaturowych z zakresu przepływu polimerowych kompozytów drzewnych w procesie

wyłaczania jest niewielka. Pojedyncze prace Xiao i Tzoganakisa [9, 11] dotyczą wyłaczania kompozytu o podstawie z polietylenu dużej gęstości i zawartości 50 % mączki drzewnej. Autorzy zaobserwowali m.in. nierównomierne wypełnienie kanału ślimaka wyłaczarki oraz nieznaczny segregację składowych kompozytu — polimeru i mączki drzewnej. W pobliżu biernej części kanału pojawiał się głównie polietylen, natomiast mączka drzewna występowała przede wszystkim przy aktywnej części kanału. Nie wyjaśniono jednak zaobserwowanych zjawisk, nie podjęto również próby modelowania takiego przepływu.

Modelowaniu procesów ślimakowych przetwórstwa materiałów polimerowych (wyłaczania i wtryskiwania), w tym także materiałów zaawansowanych, takich jak mieszaniny polimerów i kompozyty polimerowe poświęcono ostatnio prace [17, 18].

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Materiały i program badań

Prowadzone prace dotyczyły wyłaczania jednoślismakowego polimerowego kompozytu drzewnego na podstawie polipropylenu z udziałem 70 % mączki drzewnej, w różnych warunkach przetwórstwa. Badania obejmowały mechanizm przepływu i uplastyczniania przetwarzanego materiału oraz podstawowe parametry procesu wyłaczania — ciśnienie i natężenie przepływu tworzywa oraz pobór mocy i prądu.

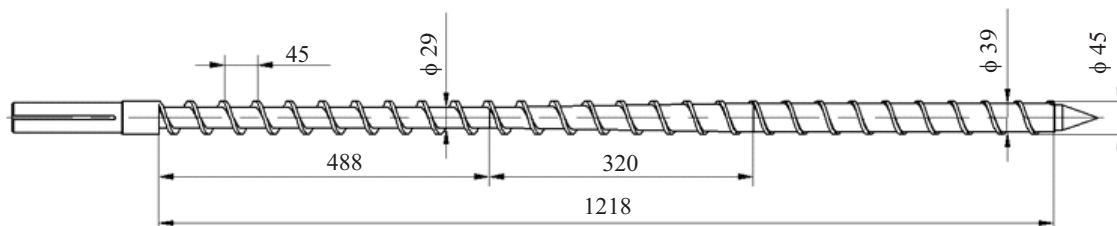
W badaniach wykorzystano tworzywo Lignocel® N (firmy J. Rettenmaier & Söhne), suszone przed procesem wyłaczania w temp. 90 °C przez 4 h.

Charakterystykę cieplno-mechaniczną przedstawia tabela 1.

T a b e l a 1. Charakterystyka badanego kompozytu WPC
T a b l e 1. Characteristics of the investigated wood-plastic composite

Właściwość	Wartość
Gęstość, g/cm ³	1,21
Gęstość nasypowa, g/cm ³	0,36–0,48
Zawartość włókien drzewna, %	70
Długość włókien drzewna, mm	0,8–1,1
Wytrzymałość na zginanie, N/mm ²	85
Moduł sprężystości przy zginaniu, N/mm ²	8000
Wytrzymałość na rozciąganie, N/mm ²	40
Moduł sprężystości wzdłużnej, N/mm ²	6300
Udarność metodą Charpy'ego, kJ/m ²	10
Chłonność wody (po 1 dobie), %	1,2
Chłonność wody (po 10 dobach), %	8,1

Badania prowadzono na specjalistycznym stanowisku badawczym, którego podstawę stanowiła wyłaczarka jednoślismakowa Metalchem T-45, w trybie klasyczne-



Rys. 1. Schemat ślimaka klasycznego
Fig. 1. Conventional screw used in the study

go zasilania grawitacyjnego, tzn. bez dozowania tworzywa. Zastosowano klasyczny ślimak trójstrefowy (rys. 1) oraz głowicę prostą do wytłaczania prętów o przekroju kołowym.

Zastosowano trzy różne wartości prędkości obrotowej ślimaka: $N = 20$ obr/min, $N = 50$ obr/min i $N = 80$ obr/min.

Ustalono następujące wartości temperatury cylindra i głowicy w kolejnych strefach wytłaczarki: $T_I = 160$ °C, $T_{II} = 180$ °C, $T_{III} = 190$ °C, $T_{IV} = 190$ °C, $T_G = 180$ °C.

Mechanizm przepływu i uplastyczniania tworzywa oceniano w tzw. zimnym eksperymencie wytłaczania, z zastosowaniem techniki wyciągania ślimaka, na podstawie obserwacji próbek tworzywa zdjętych ze ślimaka wytłaczarki, po jej zatrzymaniu i gwałtownym ochłodzeniu (ang. *Screw Pulling-out Technique*).

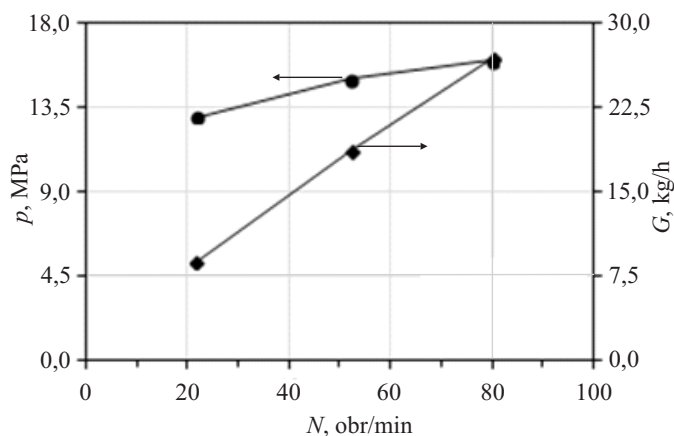
Technika ta obejmuje następujące czynności:

- uruchomienie wytłaczarki i zainicjowanie procesu wytłaczania,
- wytłaczanie tworzywa do chwili osiągnięcia warunków przepływu ustalonego,
- zatrzymanie wytłaczarki i wyłączenie urządzeń nagrzewających,
- intensywne chłodzenie układu uplastyczniającego do temperatury nieco niższej niż temperatura topnienia tworzywa, mające na celu utrwalenie (zamrożenie) struktury materiału,
- podgrzanie układu uplastyczniającego do temperatury nieco wyższej niż temperatura topnienia tworzywa, umożliwiające wyjęcie ślimaka z wytłaczarki,
- wyjęcie ślimaka z wytłaczarki,
- zdjęcie spiralnej próbki tworzywa ze ślimaka i jej ocenę.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

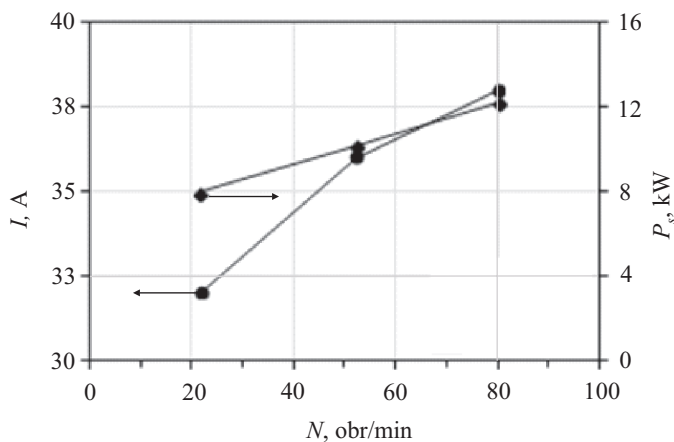
Rysunek 2 przedstawia wpływ prędkości obrotowej ślimaka na natężenie przepływu przetwarzanego materiału (wydajność wytłaczania) i ciśnienie w głowicy wytłaczarskiej, a rys. 3 – wpływ prędkości obrotowej ślimaka na pobór prądu i mocy na stanowisku badawczym. Rysunek 4 ilustruje rozkład ciśnienia wzdłuż długości cylindra wytłaczarki. Zwiększenie prędkości obrotowej ślimaka powoduje wzrost natężenia przepływu i ciśnienia tworzywa, zwiększa się też zużycie prądu i mocy. Te obserwacje są dosyć oczywiste, ale warto zwrócić uwagę, że zmiana nie jest liniowa i wyraźnie słabnie w zakresie

większych wartości prędkości obrotowej. Może to mieć związek ze zmianą charakteru przepływu materiału, tzn. z tendencją do poślizgu i kształtowania się przepływu



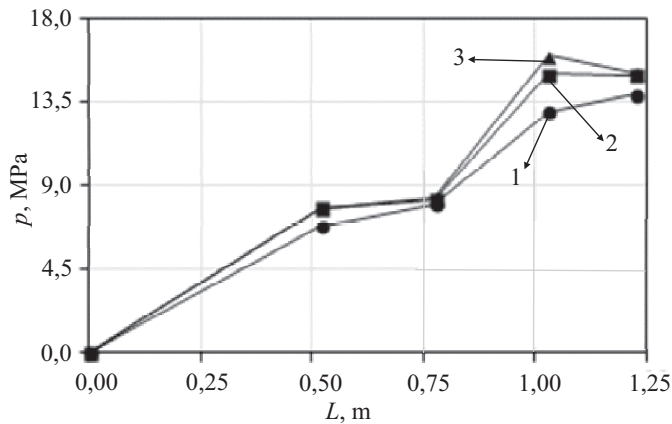
Rys. 2. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na natężenie przepływu tworzywa i ciśnienie w głowicy wytłaczarki: p – ciśnienie, G – masowe natężenie przepływu, N – prędkość obrotowa ślimaka

Fig. 2. Effect of the screw speed on the flow rate and die pressure: p – pressure, G – mass flow rate, N – screw speed



Rys. 3. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na pobór mocy i prądu na stanowisku badawczym: I – natężenie prądu, P_s – moc czynna, N – prędkość obrotowa ślimaka

Fig. 3. Effect of the screw speed on the amperage and power consumption of the test stand: I – amperage, P_s – power consumption, N – screw speed

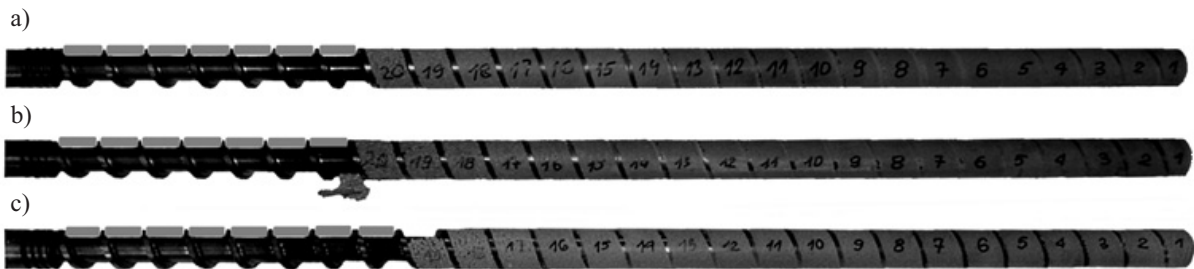


Rys. 4. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na rozkład ciśnienia w wylączarce: p – ciśnienie, L – długość wylączarki, N – prędkość obrotowa ślimaka: 1 – 21,9 obr/min, 2 – 52,4 obr/min, 3 – 80,3 obr/min

Fig. 4. Effect of the screw speed on the pressure profile along an extruder: p – pressure, L – extruder length, N – screw speed: 1 – 21.9 rpm, 2 – 52.4 rpm, 3 – 80.3 rpm

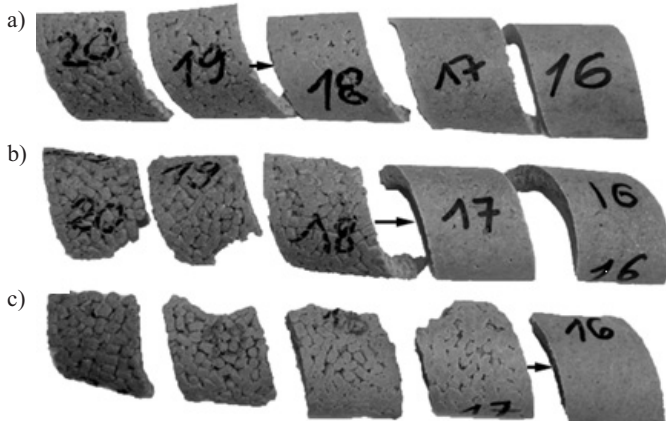
łokowego. Interesujący jest również brak przyrostu ciśnienia w strefie sprężania ślimaka (rys. 4), co może wynikać z niedostatecznego zagęszczenia materiału w tym obszarze.

W początkowej części ślimaka (rys. 5) tworzywo stopniowo się zagęszcza, przy czym zagęszczanie zachodzi od strony zwoju atakującego. Prostokąty widoczne na rys. 5 wskazują obszar bardzo słabego zagęszczenia, w którym tworzywo było bardzo luźno związane i odpadało od ślimaka przy wyciąganiu go z wylączarki. Zagęszczanie tworzywa jest pokazane na rys. 6 w widoku od strony cylindra, na rys. 7 – od strony ślimaka i na rys. 8 – w przekroju poprzecznym zwoju ślimaka. Widać wyraźnie, że zwiększająca się prędkość obrotowa ślimaka powoduje przesunięcie w prawo położenia końca zagęszczania tworzywa i wydłużenie tego obszaru. Z porównania rys. 6 i rys. 7 wynika, że zagęszczanie od strony cylindra zachodzi szybciej (zwoje 16, 17, 18) niż od strony ślimaka (zwoje 13, 14, 15).



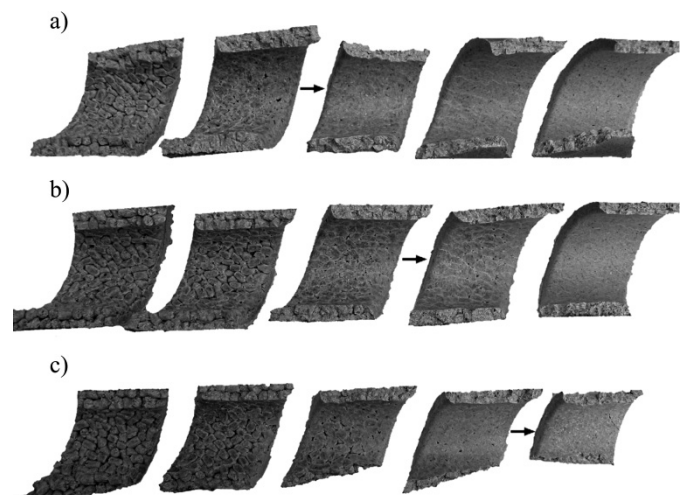
Rys. 5. Wpływ prędkości obrotowej ślimaka na charakterystykę przetwarzania kompozytu: a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min, ■ – warstwa granulatu

Fig. 5. Effect of the screw speed on the composite processing characteristics: a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm, ■ – granulate



Rys. 6. Próbkę kompozytu uzyskane w procesie wylączania z różną prędkością obrotową ślimaka, pobrane ze zwojów 16–20 (widok od strony cylindra): a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min

Fig. 6. Composite samples obtained by extrusion at different screw speeds, taken from the coils 16–20 (barrel-side view): a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm



Rys. 7. Próbkę kompozytu uzyskane w procesie wylączania z różną prędkością obrotową ślimaka, pobrane ze zwojów 13–17 (widok od strony ślimaka): a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min

Fig. 7. Composite samples obtained by extrusion at different screw speeds, taken from the coils 13–17 (screw-side view): a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm



Rys. 8. Próbkki kompozytu uzyskane w procesie wytłaczania z różną prędkością obrotową ślimaka, pobrane ze zwoju 16 (przekrój poprzeczny): a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min

Fig. 8. Composite samples obtained by extrusion at different screw speeds, from the coil 16 (cross-section): a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm

W końcowej fazie zagęszczania rozpoczyna się uplastycznianie tworzywa. Postępuje ono od strony cylindra wytłaczarki. Nie obserwuje się tutaj jednak, ani mechanizmu uplastyczniania CSM (ang. *Contiguous Solid Melting*), klasycznego dla tradycyjnego wytłaczania jednoślismakowego z zasilaniem grawitacyjnym (bez dozowania tworzywa), ani też mechanizmu obserwowanego podczas wytłaczania jednoślismakowego z dozowaniem tworzywa. Oba tych mechanizmów dotyczą ostatnie prace [19, 20] (rys. 9).

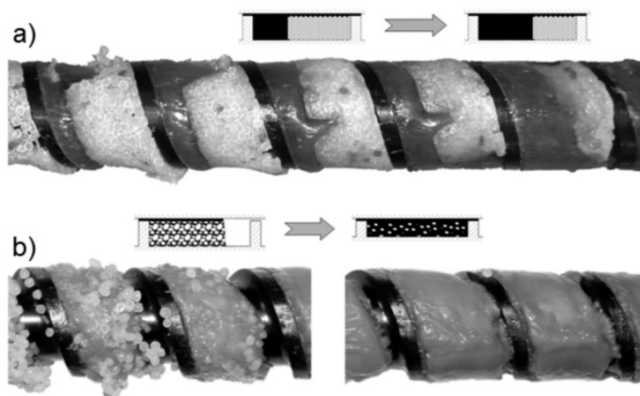
Klasyczny mechanizm uplastyczniania zaobserwowali po raz pierwszy Maddock i Street, ale Tadmor jako pierwszy zbudował model matematyczny uplastycznia-

nia tworzywa w wytłaczarce jednoślismakowej [16]. Zgodnie z tym mechanizmem (rys. 9a), uplastycznianie tworzywa zachodzi od strony cylindra, gdzie tworzy się cienka warstewka tworzywa uplastycznionego, która jest następnie zbierana przez ściankę zwoju ślimaka. Tworzywo uplastycznione gromadzi się w tylnej, aktywnej części kanału, podczas gdy część przednia – pasywna – jest wypełniona tworzywem stałym. W miarę postępu uplastyczniania, szerokość warstwy stałej tworzywa stopniowo się zmniejsza.

Rysunek 10 przedstawia próbki tworzywa (w przekroju poprzecznym) pobrane z obszaru uplastyczniania tworzywa. Jest oczywiste, że mechanizm Tadmora tu nie występuje. W tym przypadku można się spodziewać uplastyczniania jednowymiarowego, postępującego w kierunku od cylindra do ślimaka. Wskazuje na to również wniosek wynikający z porównania rys. 6 i 7, zgodnie z którym zagęszczanie od strony cylindra zachodzi szybciej. Taki jednowymiarowy mechanizm uplastyczniania może być niekiedy obserwowany w przypadku wytłaczania tworzyw sproszkowanych [21].

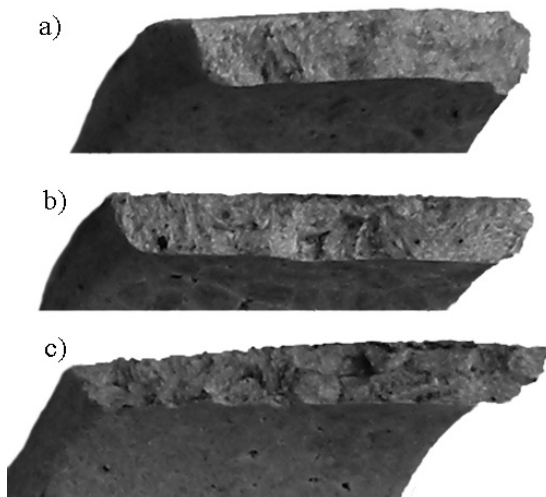
Przepływ tworzywa w końcowej części ślimaka w obszarze materiału całkowicie uplastycznionego obrazuje rys. 11. W warunkach małej prędkości obrotowej ślimaka na powierzchni styku tworzywa z cylindrem powstaje wyraźna warstewka tworzywa uplastycznionego, której grubość zmniejsza się wraz ze zwiększającą się prędkością obrotową ślimaka.

Proponowany w tej pracy mechanizm uplastyczniania w wytłaczarce jednoślismakowej polimerowego kompozytu drzewnego o dużej zawartości mączki drzewnej przedstawia rys. 12. Uplastycznianie zachodzi od strony cylindra, gdzie powstaje cienka warstewka tworzywa uplastycznionego. W miarę postępu uplastyczniania grubość warstewki się zwiększa, ale ilość uplastycznionego materiału jest zbyt mała, aby przy zwoju atakującym mógł się utworzyć wyraźny obszar tworzywa



Rys. 9. Uplastycznianie w wytłaczarce jednoślismakowej [19]: a) wytłaczanie tradycyjne z zasilaniem grawitacyjnym, mechanizm uplastyczniania typu CSM (ang. *Contiguous Solid Melting*), b) wytłaczanie z dozowaniem tworzywa, uplastycznianie dwuetapowe w wyniku przewodzenia i wg modelu dyspersyjnego

Fig. 9. Melting in a single-screw extruder [19]: a) conventional extrusion with gravity feeding, *Contiguous Solid Melting* (CSM) melting mechanism, b) starve-fed extrusion, two-stage melting mechanism by conduction and according to the dispersed melting model



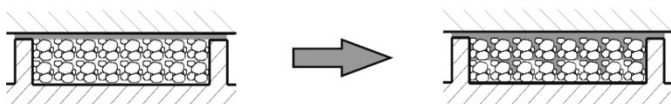
Rys. 10. Próbkki kompozytu uzyskane w procesie wytlaczania z rónnã prędkoœciã obrotowã Ÿlimaka, pobrane ze zwoju 14 (przekrój poprzeczny): a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min

Fig. 10. Composite samples obtained by extrusion at different screw speed, from the coil 14 (cross-section): a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm



Rys. 11. Wpływ prędkoœci obrotowej Ÿlimaka na charakterystykę przepływu kompozytu: a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min

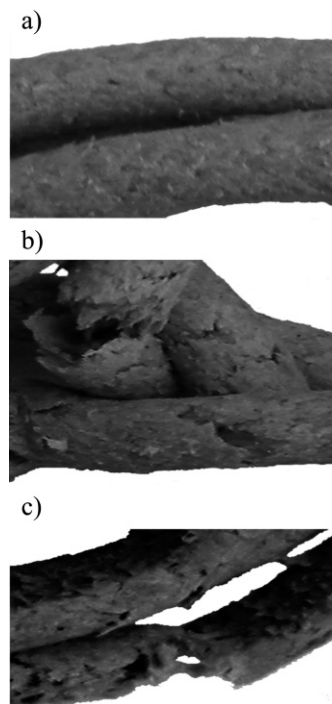
Fig. 11. Effect of the screw speed on the composite flow characteristics: a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm



Rys. 12. Mechanizm uplastycznienia kompozytu polimero-wo-drzewnego z du¿ã zawartoœciã mączki drzewnej

Fig. 12. Melting mechanism for wood-plastic composite with high wood flour content

uplastycznionego (tzw. jeziorko), tak jak w przypadku wytłaczania tworzyw termoplastycznych. Uplastyczniony kompozyt o dużej zawartości mączki drzewnej przenika stopniowo w kierunku Ÿlimaka. W zwiãzku z tym wydaje siê, że proces przebiega według mechanizmu

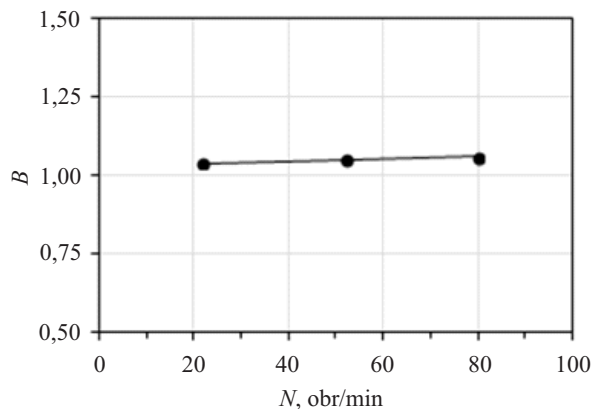


Rys. 13. Próbkki kompozytu uzyskane w procesie wytlaczania z rónnã prędkoœciã obrotowã Ÿlimaka, pobrane u wylotu g³owicy (efekt rozdzierania): a) $N = 20$ obr/min, b) $N = 50$ obr/min, c) $N = 80$ obr/min

Fig. 13. Composite samples obtained by extrusion at different screw speeds taken from the die (surface tearing effect): a) $N = 20$ rpm, b) $N = 50$ rpm, c) $N = 80$ rpm

uplastycznienia jednokierunkowego, zachodzãcego g³ównie na drodze przewodzenia i postêpujãcego w kierunku od cylindra do Ÿlimaka.

W toku wytłaczania kompozytów WPC zaobserwowano wyraźny efekt rozdzierania (ang. *surface tearing*). Rysunek 13 przedstawia wpływ prędkoœci obrotowej Ÿlimaka na chropowatoœć powierzchni wytłaczanego mate-



Rys. 14. Wpływ prędkoœci obrotowej Ÿlimaka na rozszerzenie strugi: B – stopieñ rozszerzania strugi, N – prędkoœć obrotowa Ÿlimaka

Fig. 14. Effect of the screw speed on the extrudate swell: B – extrudate swell, N – screw speed

riału. Zwiększenie prędkości obrotowej ślimaka powoduje pogorszenie jakości powierzchni.

Stopień rozszerzania strugi tworzywa, definiowany stosunkiem średnicy wytłaczanego materiału do średnicy ustnika głowicy wytłaczarskiej, miał wartość niewielką i nieznacznie zwiększającą się ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka (rys. 14). Ta obserwacja potwierdza dostępne dane literaturowe.

PODSUMOWANIE

Zbadano doświadczalnie przepływ polipropylenowego kompozytu drzewnego z udziałem 70 % mączki drzewnej w procesie wytłaczania jednoślímakowego, w różnych warunkach technologicznych przetwórstwa. Oceniono przebieg uplastyczniania i przepływu tworzywa na podstawie tzw. zimnego eksperymentu wytłaczania z zastosowaniem techniki wyciągania ślimaka.

Stwierdzono, że przepływ polimerowych kompozytów drzewnych jest zasadniczo odmienny od przepływu tworzyw termoplastycznych. W początkowej części ślimaka tworzywo zagęszcza się stopniowo, od strony zwoju atakującego. Długość strefy zagęszczania wydłuża się ze wzrostem prędkości obrotowej ślimaka. W końcowej fazie zagęszczania rozpoczyna się uplastycznianie tworzywa według postulowanego uplastyczniania jednowymiarowego, postępującego w kierunku od cylindra do ślimaka.

W przypadku kompozytów o dużej zawartości mączki drzewnej mechanizm uplastyczniania jest odmienny od mechanizmu uplastyczniania tworzyw termoplastycznych. Odmienny jest również mechanizm przepływu kompozytu w stanie uplastycznionym, z tendencją do poślizgu i przepływu tłokowego. Modelowanie procesu wytłaczania kompozytów polimerowo-drzewnych wymaga więc odmiennego podejścia niż modelowanie wytłaczania tworzyw termoplastycznych. Na podstawie badań własnych i danych literaturowych można stwierdzić, że różnice dotyczące mechanizmu uplastyczniania i charakteru przepływu kompozytu zwiększają się wraz z zawartością mączki drzewnej.

LITERATURA

- [1] Bledzki A.K., Reihmane S., Gassan J.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **1998**, 37, 451.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559808001373>
- [2] Klyosov A.A.: „Wood-Plastic Composites”, Interscience Publishers, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey 2007.
- [3] Oksman Niska K., Sain M.: „Wood-Polymer Composites”, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Cambridge 2008.
- [4] Zajchowski S., Ryszkowska J.: *Polimery* **2009**, 54, 674.
- [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 2002: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings **2002**, 39, 197.
- [10] Xiao K., Tzoganakis C.: ANTEC 2002: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings **2002**, 39, 975.
- [11] Xiao K., Tzoganakis C.: ANTEC 2002: Plastics-Annual Technical Conference, Conference Proceedings **2002**, 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] Solfaghari A., Behraves A.H., Shakouri E., Soury E.: *Polymer Engineering and Science* **2010**, 50, 543.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.21567>
- [16] Wilczyński K.: „Reologia w przetwórstwie tworzyw sztucznych”, WNT, Warszawa 2001.
- [17] Ariffin A., Ahmad M.S.B.: *Polymer-Plastics Technology and Engineering* **2011**, 50, 395.
<http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.543228>
- [18] 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>
- [19] Wilczyński K., Lewandowski A., Wilczyński K.J.: *Polymer Engineering and Science* **2012**, 52, 1258.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23076>
- [20] Wilczyński K.J., Nastaj A., Lewandowski A., Wilczyński K.: *Polymer Engineering and Science* **2014**, 54, 2362.
<http://dx.doi.org/10.1002/pen.23797>
- [21] Campbell G.: ANTEC 2011: Plastics—Annual Technical Conference, Conference Proceedings **2011**, 47, 1367.

Otrzymano 7 I 2015 r.