

Magdalena URBANIAK¹, Andrzej K. BŁĘDZKI²
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, ¹Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, ²Instytut Inżynierii Materiałowej, al. Piastów 19, 70-310 Szczecin
e-mail: murbaniak@zut.edu.pl

Hybrydowe biokompozyty polimerowe wzmocnione mikro włóknami z łusek zbożowych i mączką drzewną

Streszczenie: Warunkiem zrównoważonego rozwoju gospodarczego jest ochrona środowiska naturalnego, zatem konieczne jest stosowanie eko-przyjaznych technologii i nowoczesnych materiałów, takich jak biokompozyty polimerowe zarówno termoplastyczne, jak i duroplastyczne wzmocniane włóknami naturalnymi. Biokompozyty te znajdują coraz szersze zastosowania inżynierskie. W artykule przedstawiono wyniki badań hybrydowych biokompozytów polimerowych na podstawie biożywiccy epoksydowej wzmocnionych mikro włóknami pozyskanymi z produktów ubocznych pochodzących z przemysłu rolno-spożywczego oraz z przemysłowej mączki drzewnej. Zastosowano mikro włókna z łusek zbożowych - owsa i jęczmienia, które są dotychczas niezagospodarowanym racjonalnie odpadem przemysłu zbożowego, powstającymi podczas mielenia zbóż. Opracowane hybrydowe materiały kompozytowe wykazały wyższe właściwości wytrzymałościowe i użytkowe w stosunku do klasycznego kompozytu WPC i mogą stanowić jego przyjazną środowisku alternatywę.

Słowa kluczowe: kompozyty polimerowe, biokompozyty hybrydowe, włókna naturalne, biożywica epoksydowa, właściwości mechaniczne

HYBRID BIOCOMPOSITES REINFORCED WITH FIBRES FROM GRAIN BY-PRODUCTS AND SOFTWOOD FLOUR

Abstract: Sustainable progress of economy is conditioned under environmental requirements then more extensive applications of eco-friendly technology and novel materials like polymer composites, both thermoplastic and thermosetting ones reinforced with natural fibres are needful. Such biocomposites are applicable widely in material engineering now. This article comprises the results of research on hybrid polymer biocomposites with bio-based epoxy resin reinforced with microfibres derived from grain by-products of agricultural industry or arised from industrial grade wood flour. Microfibres from grain husks of oat and barley as unutilized waste of milling industry were used. Manufactured hybrid composite materials showed improved mechanical and profitable properties compared to standard WPC composites and owing to that can be eco-friendly alternative for the latter.

Keywords: polymer composites, hybrid biocomposites, natural fibres, bio-based epoxy resin, mechanical properties

1. WPROWADZENIE

Rosnąca świadomość ekologiczna społeczeństwa i coraz ostrzejsze wymogi prawne dotyczące ochrony środowiska, zwłaszcza w krajach Unii Europejskiej wymuszają poszukiwania i ciągły rozwój nowych materiałów, nakierowany na wykorzystanie surowców ze źródeł odnawialnych. Z tego względu biokompozyty termoplastyczne, jak i duroplastyczne wzmocniane włóknami pochodzenia naturalnego są coraz szerzej wyko-

rzystywane w wielu gałęziach gospodarki i stały się alternatywą dla klasycznych kompozytów polimerowych z włóknami syntetycznymi, np. szklanymi [1, 2]. Zastosowanie tych eko-przyjaznych kompozytów rośnie szybko z roku na rok, zwłaszcza w budownictwie i produkcji środków transportu (przemysł motoryzacyjny, kolejnictwo) [2÷5]. Biokompozyty są atrakcyjnym materiałem zarówno dla producentów, jak i konsumentów, ze względu na umożliwienie obniżania ceny końcowej wyrobów i uniezależnienia jej od

cen ropy naftowej, zachowując relatywnie dobre właściwości mechaniczne wyrobów przy ich małej gęstości [2÷6], a także zapewniają zmniejszenie obciążenia środowiska naturalnego w całym okresie ich cyklu życia. Jednocześnie stymulowany przepisami ochrony środowiska ciągły wzrost świadomości ekologicznej wśród producentów i konsumentów sprawia, że wyrobom produkowanym z tworzyw i kompozytów stawiane są coraz wyższe wymagania jakościowe, wytrzymałościowe i ekonomiczne. Szczególnie istotnymi zagadnieniami są aktualnie: redukcja kosztów produkcji, tworzenie lżejszych elementów i zmniejszenie zużycia materiałów.

Interesującą, konkurencyjną alternatywę dla standardowych tworzyw polimerowych wzmocnianych włóknami drzewnymi (WPC) stanowią produkty uboczne pochodzące z przemysłu rolno-spożywczego [7, 8]. Agrowłókna, tzn. mikrowłókna pozyskiwane z łusek zbożowych są niezagospodarowanymi do tej pory odpadami przemysłu zbożowego powstającymi podczas mielenia różnych zbóż. Poza tym, są to mikrowłókna roślin pozyskiwanych w okresach liczonych w miesiącach, a nie wielu lat, jak to jest z mikrowłóknami drewna. W tabeli 1 zestawiono informacje o dostępności tych włókien naturalnych, o ich wielkości upraw i cenie. Za stosowaniem agrowłókien zamiast włókien drzewnych przemawia nie tylko znacznie krótszy okres odnawialności źródeł zaopatrzenia, ale też niższa o ok. 40 % cena oraz łatwość pozyskiwania i akwizycji w ilościach przemysłowych. Uprawa zbóż w latach 2006÷2015 w Polsce była utrzymywana mniej więcej na stałym poziomie i wynosiła w przypadku owsa ok. 1,0÷1,5 mln ton/rok, a jęczmienia ok. 3÷4 mln ton/rok, gwarantując łatwy dostęp do łusek zbóż w ilościach przemysłowych [9]. Natomiast pozyskiwanie drewna z polskich lasów w tym okresie wzrosło od 32,384 tys. m³ do 41,375 tys. m³, co daje średni wzrost o 2,83 % rocznie [10].

Klasyczne kompozyty hybrydowe zawierają kombinację syntetycznych włókien (węglowych, szklanych, kevlarowych itp.) i stosowane są w celu uzyskania jak najniższej ceny i wyso-

kiej wytrzymałości finalnego produktu. W kombinacji włókien syntetycznych i naturalnych, jak również różnych włókien naturalnych (juty, lnu, sizalu, konopi, banana, bambusa, kokosu, agawy, itp.) uzyskać można pozytywny efekt hybrydowy (zwany hybrydyzacją), jakim jest wzmocnienie polimerowej osnowy kompozytów [11, 12]. Takie hybrydowe włókna w kompozycie są w stanie przetrzymać wyższe obciążenia niż w przypadku wzmocnienia jednorodnym włóknem i uzyskać to wzmocnienie w różnych kierunkach, a otaczająca włókna matryca utrzymuje je w pożądanym położeniu i orientacji, działając jako nośnik przenoszenia wysokich obciążeń między nimi [13, 14].

Hybrydyzacja może polepszyć właściwości mechaniczne ponieważ (a) zastosowanie w matrycy polimerowej włókien tej samej długości, ale o różnej średnicy jest korzystniejsze niż użycie włókna jednego rodzaju w kompozycie. Różnica średnic włókien zwiększa bowiem efektywną powierzchnię dla adhezji włókno-osnowa i stąd może następować pełniejsze przenoszenie naprężenia. Ponadto (b) lepszy transfer obciążenia od osnowy do włókien, a stąd polepszenie właściwości mechanicznych następuje gdy włókno cechuje się wysokim wydłużeniem względnym, co przeciwdziała uszkodzeniom matrycy [12].

W biokompozytach polimerowych nie tylko ich włóknista matryca, ale i osnowa może być wykonana z surowców ze źródeł odnawialnych [15]. Oleje roślinne stanowią potencjalny odnawialny, eko-przyjazny substytut surowców petrochemicznych przy produkcji polimerów [16]. Obecnie jednym z najczęściej stosowanych sposobów syntezy biożywic epoksydowych jest epoksydacja różnych olejów roślinnych (np. lnianego, sojowego), głównie z użyciem estrów kwasów tłuszczowych z glicerolu [17, 18].

W prezentowanej pracy badawczej opracowano materiał, w którym osnowa polimerowa z biożywicy epoksydowej wzmocniana była hybrydowym wzmocnieniem naturalnym - mikrowłóknami z łusek zbożowych (owsa i jęczmienia) i mączką drzewną oraz porównano uzyskane właściwości termomechaniczne tych hybrydo-

wych biokompozytów ze standardowym kompozytem z mączką drzewną. Mikrowłókna pozyskane z łusek zbożowych, które są do tej pory niezagospodarowanymi produktami ubocznymi przemysłu młynarskiego, mogą stać się alternatywą do wciąż rosnących cen drewna, jak i jego niedoboru w niektórych regionach świata.

2. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

2.1. MATERIAŁY

Osnowę biokompozytów stanowiła żywica epoksydowa Biresin (prod. Sika) i jej odpowiedni utwardzacz oraz epoksydowany olej lniany ELO (prod. Hobum Olechemicals).

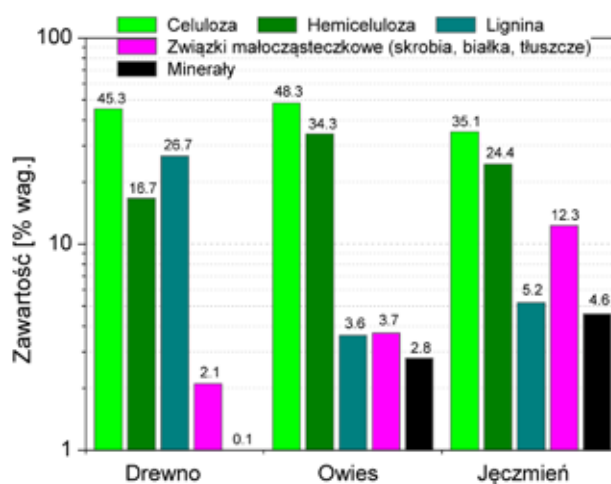
Jako wzmocnienie zastosowano mikrowłókna naturalne:

- mikrowłókna z łusek zbożowych: owsa i jęczmienia o wielkości cząstek: $<300 \mu\text{m}$ (prod. Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V., Niemcy),
- mikrowłókna drzewne Jeluxyl Weho 500 (prod. JELU-WERK Josef Ehrler GmbH & Co. KG, Niemcy). Jest to mączka drzewna z drzew iglastych (świerku i jodły) dostarczana w postaci jasnożółtego, drobnego proszku o właściwościach: gęstość nasypowa = 130 g/l , $\text{pH} = 5,5$, zakres długości włókien $75\text{-}500 \mu\text{m}$. Skład chemiczny użytych mikrowłókien naturalnych [19] przedstawiono na rysunku 1. Mikrowłókna z łusek zbożowych, zwłaszcza

Tab. 1. Dostępność i informacje marketingowe włókien naturalnych [9, 10]

Tab. 1. Availability and market information for natural fibres [9, 10]

Włókna	Źródło	Region uprawy	Okres zbioru	Zbiory w 2015r. [ton/ha]	Produkcja na świecie w 2015r. [mln ton]	Cena [USD/kg]
Drzewne	pień	Świat	60–80 lat	5,8	1714	0,35 - 0,45
Owies	źdźbło / kłos	Europa, Ameryka Pn.	co roku	2,4	22,7	0,20
Jęczmień	źdźbło / kłos	Europa, Ameryka Pn.	co roku	2,9	144,9	0,27



Rys. 1. Skład chemiczny włókien naturalnych [19]

Fig. 1. Chemical composition of natural fibres [19]

z owsa mają zawartość krystalicznej celulozy ok. 48 % wag., podobną do mikrowłókien drewna (ok. 45 %), zaś znacznie wyższą ok. 34 % zawartość amorficznej hemicelulozy (ok. 17 %). Z drugiej strony mikrowłókna drewna mają wyższą zawartość ligniny ok. 27 % w porównaniu do mikrowłókien zbożowych (ok. 4 %). Natomiast mikrowłókna z łusek jęczmienia odznaczają się nieznacznie mniejszą zawartością celulozy (ok. 35 %) i większą hemicelulozy (ok. 24 %). Mikrowłókna z łusek zbożowych mają ponadto małą zawartość związków małowcząsteczkowych, takich jak: białka, skrobia i tłuszcze (poniżej 4 %) i niską zawartość składników mineralnych (poniżej 5 %), przez co zyskuje się dodatkowo relatywnie niskie zużycie ścierne maszyn do przetwórstwa tworzyw polimerowych. Zawartość tych składników pochodzących z resztek ziarna, do którego przylegają łuski, pogarsza właściwości mechaniczne i użytkowe biokompozytów. W przypadku tłuszczów i białek dochodzi do ich szybkiej degradacji termicznej, zaś skrobia pomimo stabilności termicznej, może powodować obklejanie, a następnie spiekanie na powierzchni urządzeń przetwórczych, tym samym pogarsza się w znacznym stopniu stabilność procesu i właściwości biokompozytu [19].

Zatem duża zawartość trzech składników: celulozy, hemicelulozy i ligniny oraz małe udziały związków małowcząsteczkowych: białek, skrobi i tłuszczu w składzie strukturalnym włókien naturalnych warunkują uzyskanie przez wzmocnione nimi kompozyty dobrych właściwości mechanicznych i stabilność termiczną w temperaturze przetwórstwa.

2.1.1. PRZYGOTOWANIE WŁÓKIEN

Proces przygotowania mikrowłókien z łusek zbożowych odbywa się za pomocą specjalnej obróbki mechanicznej. Łuski ziaren są najpierw kondycjonowane, a następnie mielone i odpowiednio rozwłókniane przy użyciu wyłaczarki planetarnej, i na koniec przesiewane na odpowiednich sitach i sortowane. Uzysk mikrowłókien z łusek sięga 15-25 % [19].

Przed sporządzeniem biokompozytów wszystkie mikrowłókna naturalne suszono (w temperaturze 103 °C przez 16 h, zawartość wilgoci <0,3 %).

2.1.2. PRZYGOTOWANIE BOKOMPOZYTÓW

Biożywicę epoksydową (bioEP) uzyskano poprzez zmieszanie (w odpowiednim wolnoobrotowym mieszalniku mechanicznym) żywicy Biresin i epoksydowanego oleju lnianego (ELO) w stosunku 70:30 cz.wag. Następnie do mieszaniny dodano mikrowłókna naturalne w ilości 40 cz.wag. na 100 cz.wag. biożywicy, a powstałą kompozycję utwardzono odpowiednim utwardzaczem. Próbkę (80×10×4 mm) do badań termicznych i mechanicznych odlewano w teflonowych formach i utwardzono w temperaturze 140 °C przez 4 h.

2.2. METODYKA BADAŃ

Próbki uzyskanych biokompozytów poddano statycznej próbie zginania zgodnie z normą PN-EN ISO 178 i statycznej próbie rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 527 przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Instron 5982 (z prędkością badania 2 i 5 mm/min, odpowiednio). Wykonano również próby udarności próbek biokompozytów z karbem metodą Charpy'ego za pomocą młota Zwick B5102, zgodnie z normą PN-EN ISO 179. Ww. badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej.

Temperaturę ugięcia cieplnego pod obciążeniem (HDT) próbek mierzono za pomocą urządzenia Huber CC 300BX od temperatury pokojowej do 160 °C przy szybkości ogrzewania 2 °C/min. Badania wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 75.

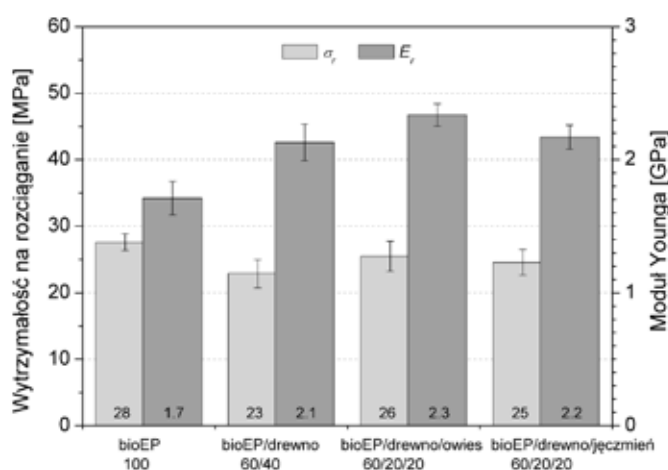
Dynamiczne właściwości termomechaniczne przy zginaniu wyznaczono przy użyciu aparatu DMA Q800 (TA Instruments). Badania przeprowadzono w zakresie temperatur od 0 °C (w atmosferze azotu) do 160 °C przy szybkości ogrzewania 3 °C/min z częstotliwością deformacji 1 Hz.

Wyznaczano wartości modułu zachowawczego (E') i modułu stratności (E'') oraz współczynnika stratności ($\tan\delta$). Temperaturę zeszklenia (T_g) wyznaczono z maksimum pików modułu stratności.

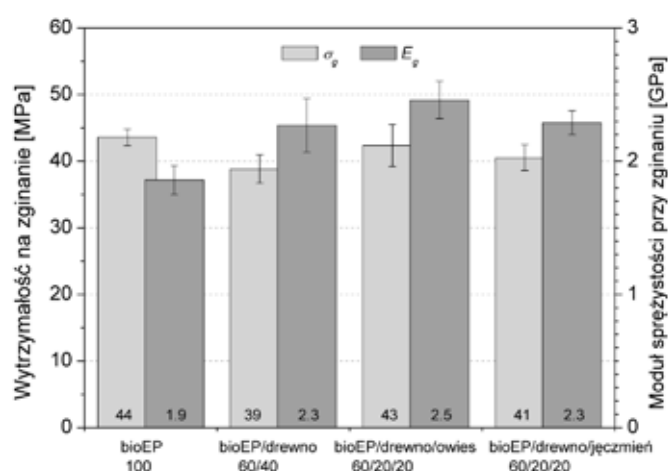
3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono wyniki badań właściwości wytrzymałościowych uzyskanych z prób statycznego rozciągania oraz zginania biożywicy epoksydowej i jej biokompozytu wzmocnionego mączką drzewną, jak też jej hybrydowych biokompozytów z mikro włóknami z łusek zbożowych (owsa i jęczmienia) i mączki

drzewnej. Zaobserwować można, że biokompozyty hybrydowe z udziałem mikro włókien z łusek owsa odznaczają się wyższą wytrzymałością na rozciąganie, jak i na zginanie niż biokompozyty hybrydowe z udziałem mikro włókien z łusek jęczmienia, odpowiednio o ok. 10 i 5 % w porównaniu dla klasycznych kompozytów z mączką drzewną. Wynika to z faktu, że spośród użytych mikro włókien naturalnych to właśnie owies ma najwyższą zawartość celulozy, rzędu 48 % (rys. 1), będącej składnikiem strukturalnym mikro włókien wzmocniających. Wszystkie badane biokompozyty wykazały niewielki spadek wytrzymałości w stosun-



Rys. 2. Wytrzymałość na rozciąganie i moduł Younga biokompozytów epoksydowych
Fig. 2. Tensile strength and Young's modulus of epoxy biocomposites



Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości przy zginaniu biokompozytów epoksydowych
Fig. 3. Flexural strength and flexural modulus of epoxy biocomposites

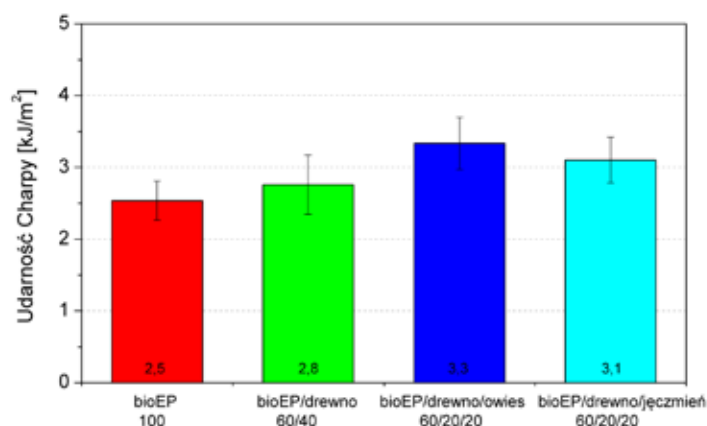
ku do czystej biożywicy epoksydowej. Jest to spowodowane niewielką długością zastosowanych mikrowłókien i stąd niewielkiego stosunku długości do średnicy (od 1,7 do 2,7 [19]).

Korzystny jest natomiast wpływ mikrowłókien naturalnych na moduł sprężystości biokompozytów. Dodatek mikrowłókien z łusek zbożowych do biokompozytu z mączką drzewną zwiększył moduł sprężystości o ok. 30-35 %, zarówno przy rozciąganiu, jak i zginaniu (rys. 2 i 3). Podwyższenie sztywności jest wynikiem ograniczenia odkształcenia osnowy polimerowej przez dodatek napełniacza włóknistego.

Wyniki badań udarności metodą Charpy'ego biokompozytów epoksydowych przedstawiono na rysunku 4. Mikrowłókna z łusek owsa, jak

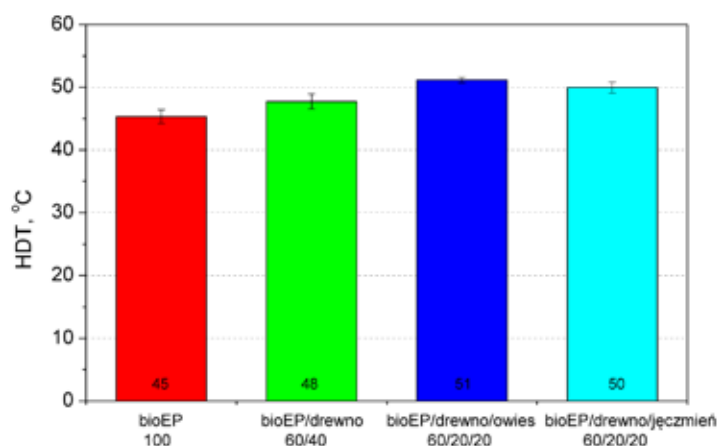
i z jęczmienia w składzie biokompozytów hybrydowych spowodowały zwiększenie udarności odpowiednio o ok. 30 i 25 % w stosunku do czystej biożywicy, a ponad 15 % w porównaniu do klasycznego kompozytu z mączką drzewną.

Oprócz badań właściwości wytrzymałościowych przeprowadzono również badania właściwości termicznych (HDT), jak i właściwości dynamiczno-termomechanicznych (DMA) biokompozytów epoksydowych, które posłużyły do wyznaczenia istotnych parametrów użytkowych materiałów biokompozytowych wymaganych na wyroby techniczne, m.in. temperatury ugięcia cieplnego pod obciążeniem i temperatury zeszklenia, a także dynamicznego modułu zachowawczego.



Rys. 4. Udarność Charpy'ego biokompozytów epoksydowych

Fig. 4. A-notch Charpy impact strength of epoxy biocomposites



Rys. 5. Temperatura ugięcia cieplnego pod obciążeniem dla biokompozytów epoksydowych

Fig. 5. Heat deflection temperature under load of epoxy biocomposites

Tab. 2. Wyniki DMA dla biokompozytów epoksydowych

Tab. 2. DMA results for epoxy biocomposites

Właściwości		Osnowa	Włókna naturalne		
		Biożywica epoksydowa	drewno (40 %)	drewno/owies (20/20 %)	drewno/jęczmień (20/20 %)
Moduł zachowawczy E' , GPa	25 °C	1,47	1,76	2,08	1,89
	50 °C	0,97	1,18	1,44	1,36
	80 °C	0,01	0,04	0,05	0,04
Temperatura zeszklenia T_g (z E''), °C	-	55,7	57,2	59,4	58,8

Wartości temperatury ugięcia cieplnego pod obciążeniem (HDT) biokompozytów epoksydowych przedstawiono na rysunku 5. Uzyskano kilkustopniowy wzrost temperatury HDT, największy w przypadku biokompozytów hybrydowych z mikrowłóknami z łusek owsa.

Uzyskane metodą DMA wyniki badań dynamicznego modułu zachowawczego E' w temperaturze pokojowej i podwyższonej (w 50 i 80 °C) oraz temperaturę zeszklenia badanych biokompozytów epoksydowych zestawiono w tabeli 2. Stwierdzono wzrost modułu zachowawczego (E') i temperatury zeszklenia (T_g) po dodaniu mikrowłókien naturalnych. Na poziomie temperatury zeszklenia biokompozytów (ok. 60 °C) wartość modułu zachowawczego jest ok. 35 % niższa niż w temperaturze pokojowej. Znaczny spadek wartości modułu w temperaturach powyżej T_g powodowany jest zwiększeniem ruchliwości fragmentów łańcuchów polimerowych, a możliwy wówczas ruch segmentów łańcuchów i występowanie poślizgu większych obszarów makrocząsteczek powoduje pogorszenie właściwości wytrzymałościowych biokompozytów. Spośród wytworzonych biokompozytów najwyższą odpornością na temperaturę odznaczają się biokompozyty hybrydowe z mikrowłóknami z łusek owsa.

4. PODSUMOWANIE

Wyniki przedstawionych badań termomechanicznych hybrydowych biokompozytów epoksydowych, otrzymanych z kombinacji mi-

krowłókien pochodzących z łusek zbóż – owsa i jęczmienia oraz mikrowłókien drzewnych, wykazały lepsze właściwości, zwłaszcza wzrost sztywności i odporności na kruche pękanie w porównaniu do klasycznego kompozytu z mączką drzewną (WPC).

Łuski, które jak dotąd są niezagospodarowanymi produktem ubocznym przemysłu zbożowego, stanowić mogą tani, odnawialny i łatwo dostępny surowiec do produkcji mikrowłókien wzmacniających do zastosowania w biokompozytach polimerowych, zwłaszcza hybrydowych, stanowiących ewidentną alternatywę, a nie tylko substytut dla kompozytów z mączką drzewną.

5. PODZIĘKOWANIA

Praca została współfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki, w ramach projektu nr UMO-2014/15/B/ST8/02715.

Autorzy składają podziękowania firmom:

- Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung e.V. (ILU) za dostarczenie mikrowłókien z łusek zbożowych,
- JELU-WERK za dostarczenie mikrowłókien drewna.

LITERATURA

1. Błędzki A.K., Urbaniak M., Jaszkievicz A., Feldmann M.: *Włókna celulozowe jako alternatywa dla włókien szklanych w kompozytach polimerowych*, Polimery 2014, 59, 372-382.

2. Bledzki A.K., Jaszkievicz A., Urbaniak M., Stankowska-Walczak D.: *Biocomposites - in the Past and in the Future*. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2012, 96, 15-22.
3. Bledzki A.K., Gassan J.: *Composites reinforced with cellulose based fibres*. *Prog. Polym. Sci.* 1999, 24, 221-274.
4. Faruk O., Bledzki A.K., Fink H.-P., Sain M.: *Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010*. *Prog. Polym. Sci.* 2012, 37, 1552-1596.
5. Urbaniak M., Gołuch R., Błędzki A.K., Gajdziński S., Krysiński P., Józefiak A.: *Lekkie kompozyty konstrukcyjne na bazie surowców odnawialnych do zastosowań w transporcie*. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze* 2014, 2, 63-67.
7. Ramamoorthy S.K., Skrifvars M., Persson A.: *A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers*. *Polymer Reviews* 2015, 55, 1, 107-162.
8. Mamun A.A., Heim H.-P., Bledzki A.K.: *The use of maize, oat, barley and rye fibres as reinforcements in composites*. In: Faruk O., Sain M. *Biofiber Reinforcement in Composite Materials*, Elsevier, Amsterdam 2015, 454-487.
9. Urbaniak M., Błędzki A.K.: *Biokompozyty epoksydowe wzmocniane naturalnymi włóknami krótkimi oraz mikrowłóknami z łusek zbożowych*. *Inżynieria Materiałowa* 2015, 5, 211-215.
10. The Statistics Division of the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. <http://faostat3.fao.org/home/E> (online 23.06.2017)
11. Knoema. *Roundwood production*. <https://knoema.com/tag00072-20160613/roundwood-production> (online 28.06.2017)
12. Sathishkumar T.P., Naveen J., Satheeshkumar S.: *Hybrid fiber reinforced polymer composites – a review*. *J. Reinf. Plast. Comp.* 2014, 33, 5, 454-471.
13. Gupta M.K., Srivastava R.K.: *Mechanical Properties of Hybrid Fibers-Reinforced Polymer Composite: A Review*. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2016, 55, 6, 626-642.
14. Jawaid M., Abdul Khalil H.P.S.: *Cellulosic/synthetic fiber reinforced polymer hybrid composites*. *Carbohydr. Polym.* 2011, 86, 1-18.
15. Muthuvel M., Ranganath G., Janarthanan K., et al.: *Characterization study of jute and glass fiber reinforced hybrid composite material*. *Int. J. Eng. Res. Tech.* 2013, 2, 335-344.
16. Bledzki A.K., Urbaniak M., Böttcher A., Berger Ch., Pilawka R.: *Bio-based epoxies and composites for technical applications*. *Key Engineering Materials* 2013, 559, 1-6.
17. Montero de Espinosa L., Meier M. A.R.: *Plant oils: The perfect renewable resource for polymer science?!*. *European Polym. J.* 2011, 47, 5, 837-852.
18. Wang Z., Yuan L., Ganewatta M.S., Lamm M.E., Rahman Md A., Wang J., Liu S., Tang C.: *Plant Oil-Derived Epoxy Polymers toward Sustainable Biobased Thermosets*. *Macromol. Rapid Commun.* 2017, 38, 11, 1700009.
19. Tsujimoto T., Takeshita K., Uyama H.: *Bio-based Epoxy Resins from Epoxidized Plant Oils and Their Shape Memory Behaviors*. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2016, 93, 12, 1663-1669.
20. Knapen R., Kretschmer P.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Mikrofasern aus Getreidenebenprodukten zur Verstärkung thermoplastischer und duromerer Biocomposite*. *Zwischenbericht I/2014*, Institut für Lebensmittel- und Umweltforschung 2014.

Data wpłynięcia artykułu do redakcji: 15-06-2017

Data akceptacji publikacji do druku: 26-07-2017