

# Kompozyty polipropylenowe o strukturze porowatej i litej wzmocnione włóknami ciętymi<sup>\*)</sup>

Jolanta Janik<sup>1)</sup>

DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2020.3.5](https://dx.doi.org/10.14314/polimery.2020.3.5)

**Streszczenie:** Wytwarzano spienione kompozyty termoplastyczne wzmocnione włóknem pochodzenia naturalnego. Uzyskano lite i porowate układy na osnowie polipropylenowej (PP) wzmocnionej ciętym włóknem bazaltowym (WB). Jako środka spieniającego użyto mikrosfery (Expancel MB930). W celu poprawienia adhezji między włóknem a osnową PP do układu dodano polipropylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym PP-g-MA (Polybond 3200). Wytwarzanie kompozytów obejmowało wymieszanie składników w procesie wytłaczania, a następnie uformowanie kształtek kompozytów PP/WB w procesie wtryskiwania. Dodatkowo, na etapie wtryskiwania, wybrane układy spieniano z zastosowaniem 1,5% mas. mikrosfer. Oceniono wpływ udziału włókna (5, 10, 15% mas.) i jego preparacji, a także wpływ kompatybilizatora na właściwości litych kompozytów PP; porównano ich właściwości z cechami analogicznych układów o strukturze porowatej. Scharakteryzowano właściwości fizyko-mechaniczne (gęstość, wytrzymałość na statyczne rozciąganie i zginanie) materiałów PP/WB, poddano je także analizie termicznej DSC i termogravimetrycznej TGA. Stwierdzono, że spienione układy PP z udziałem włókien wykazują lepsze właściwości mechaniczne niż czysty PP, a dodatek kompatybilizatora do mieszanki poprawia charakterystykę wytrzymałościową otrzymanych kompozytów PP/WB.

**Słowa kluczowe:** polipropylen, włókno bazaltowe, porofor, kompozyt, kompatybilizator.

## Polypropylene composites with porous and solid structure reinforced with cut fibers

**Abstract:** The presented research concerns the production of foamed thermoplastic composites reinforced with natural fiber in the direction of obtaining lightweight construction materials. The purpose of the work was to obtain solid and porous polypropylene (PP) systems reinforced with cut basalt fiber (WB). As a foaming agent, Expancel MB930 microspheres from AkzoNobel were used, while to improve the adhesion between the fiber and the PP matrix, an additive in the form of polypropylene grafted with maleic anhydride PP-g-MA (Polybond 3200) was used. The production of composites involved mixing the ingredients by extrusion and then molding PP/WB composite in the injection process. In addition, at the injection stage, selected systems were expanded with 1.5% by weight of microspheres. The work evaluated the impact of fiber content (5, 10, 15% by weight) and its preparation as well as the impact of a compatibilizer on the properties of solid PP composites and a comparison of these properties with analogous systems with a porous structure. PP/WB materials were characterized in terms of physical and mechanical properties (density determination, static tensile and bending test); DSC and TGA thermogravimetric analysis. Foamed PP systems with fibers have better mechanical properties compared to pure PP; the addition of a compatibilizer to PP/WB composites increases the strength parameters compared to systems without its participation.

**Keywords:** polypropylene, basalt fiber, blowing agent, composite, compatibilizer.

Włókna wzmacniające znajdują bardzo szerokie zastosowanie w dziedzinie materiałów kompozytowych, a w szczególności w kompozytach polimerowych. W takich układach najczęściej wykorzystuje się włókno: szklane, bazaltowe, kwarcowe, węglowe, grafitowe, ara-

midowe (Kevlar), z polimerów syntetycznych, np. polietylenowe, oraz roślinne, pochodzenia naturalnego [1]. Wybór rodzaju, typu i postaci włókna (np. ciągłe, krótkie-cięte, tkanina, mata) decyduje o właściwościach wytwarzanej konstrukcji kompozytowej. W ostatnich la-

<sup>1)</sup> Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Polimerów, ul. Piastów 42, 70-065 Szczecin, Poland. e-mail: Jola.Janik@zut.edu.pl

<sup>\*)</sup> Treść artykułu prezentowano na konferencji Pomerania-Plast 2019, 5–7 czerwca 2019 r. w Międzyzdrojach.

tach zainteresowanie włóknami bazaltowymi znacznie wzrosło ze względu na zwiększające się zapotrzebowanie na materiały odporne na działanie wysokiej temperatury, niekorodujące, lekkie a jednocześnie wykazujące dobrą wytrzymałość [1–5]. Kompozyty wzmocnione włóknem bazaltowym, w tym także na osnowie polimerów termoplastycznych, znalazły zastosowanie m.in. w budownictwie, motoryzacji, energetyce, w przemyśle maszynowym i chemicznym. Przykładowo, w ostatnich latach na rynek wprowadzono innowacyjne rury warstwowe z polipropylenu najnowszej generacji, o rynkowej nazwie PP-RCT, wzmocnione włóknem bazaltowym [6]. Tworzywa termoplastyczne z udziałem krótkich włókien wytwarza się m.in. metodą bezpośredniego mieszania w stanie stopionym w procesie wytlaczania lub wtryskiwania, lub też w dwuetapowym procesie wytlaczania i następnie wtryskiwania. Technicznie jest to metoda najprostsza i stosunkowo tania, pozwalająca na masową produkcję. Właściwości kompozytów zależą w istotny sposób od rodzaju osnowy polimerowej i charakteru wzmocnienia. W wypadku włókien krótkich znaczenie mają: ich średnica i długość oraz zawartość i równomierne zdyspergowanie włókien w osnowie. Ważnym zagadnieniem jest także adhezja na granicy polimer/włókno, dlatego, często już na etapie przedzenia, przeprowadza się procesy preparacji powierzchni włókien. W zależności od rodzaju preparacji i przeznaczenia włókien jej ilość wynosi zwykle od 0,3 do 3,5% mas. Zabiegi te znacznie zwiększają adhezję włókien do osnowy, co prowadzi do poprawy właściwości użytkowych kompozytów [1, 7]. Czasami konieczne jest także wprowadzenie do układu środków zwiększających mieszalność składników kompozytu, tzw. kompatybilizatorów [8–10]. Wykazują one powinowactwo do obu niemieszalnych faz w układzie. Można też przeprowadzić proces impregnacji włókien za pomocą polimeru kompatybilnego z osnową, znacznie poprawiając ich adhezję i dyspergowalność. W układach opartych na osnowie polipropylenowej, jako kompatybilizator często stosuje się polipropylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym (PP-g-MA) [4, 8–12]. W życiu codziennym mamy do czynienia nie tylko z materiałami o strukturze litej, często też spotykamy się z lekkimi materiałami spienionymi o strukturze porowatej i specjalnych właściwościach. Polimery spienione to mieszanki polimerów z gazem, otrzymane za pomocą środków spieniających, tzw. poroformów (związków stałych, ciekłych lub gazowych), które pod wpływem wysokiej temperatury lub w wyniku reakcji chemicznej rozkładają się, parują, wydzielają produkty gazowe powodujące spienianie litej masy tworzywa i powstawanie struktury komórkowej. W zależności od rodzaju użytego polimeru uzyskuje się pianki sztywne lub miękkie, natomiast zależnie od ilości i wymiarów porów tworzywa porowate klasyfikuje się na podstawie ciężaru właściwego – na pianki o dużej (>240 kg/m<sup>3</sup>), średniej (240 – 1,6 kg/m<sup>3</sup>) i małej (<1,6 kg/m<sup>3</sup>) gęstości, a ze względu na rodzaj porów – na tworzywa o porach zamkniętych lub otwartych [13]. Tworzywa po-

rowate, dzięki swojej strukturze, wykazują dobre właściwości izolacyjne – termiczne i akustyczne, stanowią materiał o zmniejszonym ciężarze objętościowym, a jednocześnie wysokim wskaźniku wytrzymałości. Znalazły zastosowanie w budownictwie, chłodnictwie oraz w produkcji opakowań.

Jedną z nowszych technologii spieniania tworzyw polimerowych oferuje firma AkzoNobel, wprowadzając na rynek mikrosfery Expancel [14]. Mikrosfery spełniają podwójną funkcję – lekkiego napełniacza i poroforu. Podczas przetwórstwa w wysokiej temperaturze termoplastyczna otoczka mikrosfer mięknie, a zawarty w środku gazowy węglowodór odparowuje, kilkukrotnie zwiększając objętość mikrosfery. Stosowana tu metoda przetwórstwa to, m.in., wtryskiwanie porujące. Jest to pręźnie rozwijająca się technologia wykorzystująca wszystkie rodzaje polimerów przetwarzanych na drodze wtryskiwania konwencjonalnego (np. poliolefiny, polistyreny, poliwęglany, poliamidy) [14].

Spieniony polipropylen EPP (*expanded polypropylene*) to porowate tworzywo, znajdujące szerokie zastosowanie ze względu na swoje unikatowe właściwości, takie jak: zdolność dużej absorpcji energii, odporność na uderzenia, izolacyjność termiczna, mała nasiąkliwość, odporność na działanie wody i chemikaliów oraz korzystnie duży stosunek wytrzymałości do masy. Spieniony polipropylen, dzięki możliwości jego wykorzystania w szerokim zakresie stosunkowo małych gęstości, jest stosowany również jako materiał konstrukcyjny, w postaci kompozytu ze wzmocnieniem włóknotwórczym lub proszkowym [13–19].

Celem przedstawionych badań było wytworzenie spienionych kompozytów na osnowie PP z udziałem krótkich – ciętych włókien bazaltowych (WB) w procesie fizycznego dyspergowania poroforu w uplastycznionym układzie PP/WB. Prace prowadzono w kierunku otrzymania lekkich materiałów konstrukcyjnych o strukturze porowatej i zmniejszonej gęstości, charakteryzujących się korzystnymi właściwościami wytrzymałościowymi. Wybór osnowy polimerowej uwzględniał korzystną charakterystykę polipropylenu, a także jego masowe rozpoznanie jako materiału użytkowego.

## CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

### Materiały

W ramach badań nad modyfikacją polipropylenu, prowadzonych w Instytucie Polimerów ZUT [20–22], wytworzono kompozyty polipropylenu (PP) z udziałem 5–15% mas. włókien bazaltowych, z środkiem preparującym (WBP) i bez niego (WB) oraz, dodatkowo, z udziałem 5% mas. i bez udziału kompatybilizatora Polybond (PB), a także, w wypadku wybranych układów, z dodatkiem 1,5% mas. środka spieniającego w postaci mikrosfer (MB). W tabeli 1 przedstawiono oznaczenie i skład wytworzonych kompozytów.

**T a b e l a 1. Oznaczenie i skład wytworzonych kompozytów polipropylen/włókno bazaltowe**

**T a b l e 1. Designation and composition of prepared polypropylene/basalt fiber composites**

Symbol próbki	Skład, % mas.
PP	100
PP/5WB	95 PP, 5 włókno bazaltowe niepreparowane
PP/5WBP	95 PP, 5 włókno bazaltowe preparowane
PP/5WBP/5PB	90 PP, 5 włókno bazaltowe preparowane, 5 kompatybilizator
PP/10WB	90 PP, 10 włókno bazaltowe niepreparowane
PP/10WBP	90 PP, 10 włókno bazaltowe preparowane
PP/10WBP/5PB	85 PP, 10 włókno bazaltowe preparowane, 5 kompatybilizator
PP/15WB	85 PP, 15 włókno bazaltowe niepreparowane
PP/15WBP	85 PP, 15 włókno bazaltowe preparowane
PP/15WBP/5PB	80 PP, 15 włókno bazaltowe preparowane, 5 kompatybilizator
PP/5WBP/1,5MB PP/10WBP/1,5MB PP/15WBP/1,5MB	kompozyty spienione z mikrosferami MB; udział poroforu MB w % mas. przeliczono na sumaryczną masę mieszaniny, do której go dodano

Do wytworzenia kompozytów użyto:

- polipropylen (PP) o nazwie handlowej Moplen HP548R firmy Basell Orlen;
- cięte włókna bazaltowe firmy ISOMATEX S.A, o średniej długości włókna 5 mm oraz średnicy 11  $\mu\text{m}$ , zastosowano włókna bez środka preparującego i z naniesionym na ich powierzchnię środkiem preparującym – poliolefiną z udziałem 2% mas. bezwodnika maleinowego [20];
- środek spieniający – mikrosfery Expancel MB930 firmy AkzoNobel;
- kompatybilizator w postaci polipropylenu szczepionego bezwodnikiem maleinowym PP-g-MA o nazwie handlowej Polybond 3200 firmy Crompton w USA.

### Wytwarzanie kompozytów

Kompozyty PP otrzymywano na dwóch etapach technologicznych: I – składniki kompozytu PP mieszano mechanicznie i przetwarzano metodą wytłaczania, II – z uzyskanych na I etapie granulatów kompozytów PP w procesie wtryskiwania wytwarzano układy bez poroforu oraz z jego dodatkiem. Przygotowane kształtki kompozytów wykorzystano w dalszych badaniach.

W celu zapewnienia jak najlepszej dyspersji włókien w osnowie polimerowej, PP mechanicznie mieszano z ciętymi włóknami bazaltowymi i/lub kompatybilizatorem w odpowiednich stosunkach masowych i wytłaczano na współbieżnej dwuślimakowej wytłaczarce firmy Thermo Electron Corporation model PRISM Eurolab Digital 16 mm. Parametry technologiczne procesu wytłaczania: obroty ślimaków 200 rpm, profil temperaturowy procesu 160–225 °C.

Kształtki do badań otrzymano w procesie wtryskiwania z zastosowaniem wtryskarki ślimakowej BOY 35A, zgodnie z normą PN-EN ISO 294-1; parametry technologiczne wtryskiwania:

- kształtek litych – temperatura wtrysku 170–220 °C, temperatura formy 30 °C;
- kształtek spienionych – temperatura wtrysku 180–200 °C, temperatura formy 30 °C.

Udział mikrosfer MB 930 w kompozycie wyznaczono doświadczalnie.

### Metodyka badań

Wytworzone kompozyty PP o strukturze litej i spienionej charakteryzowano na podstawie oznaczanych właściwości fizyko-mechanicznych i termicznych.

Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON 5982, zgodnie z normami PN EN ISO 527-1-3:1996 (wytrzymałość na rozciąganie – prędkość przesuwu szczęk 50,0 mm/min) oraz PN EN ISO 178-1:1998 (wytrzymałość na zginanie – prędkość przesuwu głowicy 10,0 mm/min).

Gęstość kompozytów badano z zastosowaniem wagi hydrostatycznej firmy Radwag (ośrodek immersyjny – izopropanol).

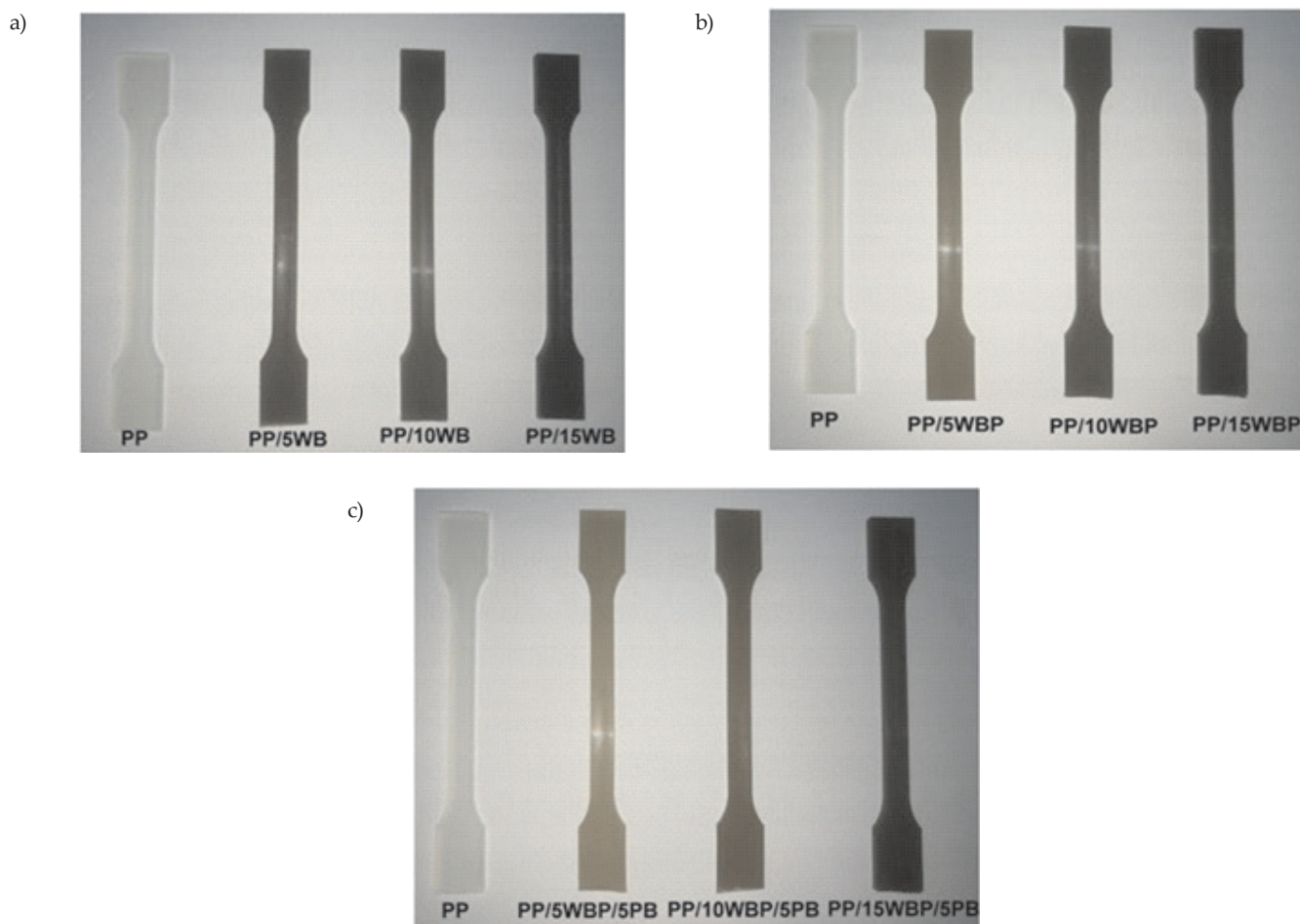
Właściwości termiczne wybranych próbek badano metodą skaningowej kalorymetrii różnicowej za pomocą aparatu DSC Q100 firmy TA Instruments (oznaczono temperaturę topnienia i stopień krystaliczności badanych układów, szybkość ogrzewania: 10 °C/min w zakresie temperatury od -50 do 200 °C).

Zawartość włókien bazaltowych w danym kompozycie określano metodą kalcynowania (wypalania w piecu) w temp. 600 °C w ciągu 4 h, a także na podstawie analizy termogravimetrycznej z wykorzystaniem aparatu TGA Q100 firmy TA Instruments (szybkość ogrzewania: 10 °C/min, zakres temperatury 0–600 °C).

### WYNIKI I ICH OMÓWIENIE

Na rys. 1 przedstawiono zdjęcia kształtek wytworzonych z litych kompozytów PP oraz z czystego PP.

Stwierdzono, że dodatek włókien bazaltowych do osnowy polipropylenowej spowodował zmianę barwy, z białej czystego PP na brudną PP z włóknami bazaltowymi, przy czym barwa ta ciemnieje wraz ze zwiększaniem udziału włókien. Uzyskany efekt jest spowodowany najprawdopodobniej jasnobrązowym kolorem samego włókna.



Rys. 1. Kształtki kompozytów polipropylenowych z udziałem 5, 10, 15% mas. włókien bazaltowych: a) włókno bazaltowe niepreparowane, b) włókno preparowane, c) włókno preparowane, dodatek kompatybilizatora

Fig. 1. Shapes of polypropylene composites with 5, 10, 15% by mass basalt fibers: a) untreated basalt fibers, b) prepared fibers, c) prepared fibers, addition of compatibilizer

### Lite kompozyty polipropylenowe

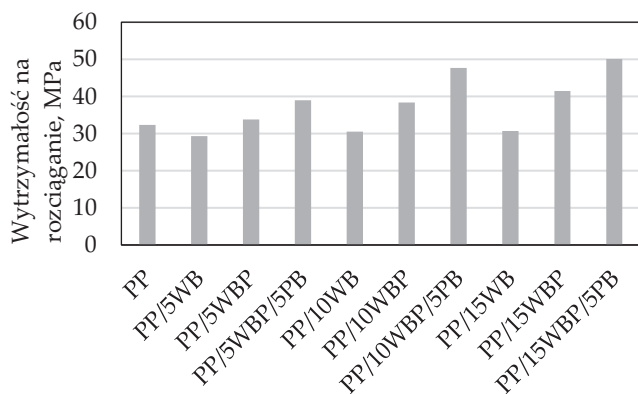
Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie ( $\sigma_m$ ) i zginanie ( $\sigma_{fm}$ ), wydłużenia względnego przy zerwaniu ( $\varepsilon_B$ ) oraz modułów sprężystości przy rozciąganiu i zginaniu ( $E_r$ ,  $E_f$ ) przedstawiono w tabeli 2 oraz na rys. 2 i 3.

Stwierdzono, że dodanie do PP odpowiednio spreparowanych włókien bazaltowych powoduje zwiększenie jego wytrzymałości na rozciąganie i zginanie oraz obu modułów wraz ze wzrostem udziału włókien w kompozycie. Kompozyty zawierające włókno niepreparowane wykazują mniejszą wytrzymałość na rozciąganie niż

Tabela 2. Właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu i zginaniu kompozytów polipropylen/włókno bazaltowe (odchylenie standardowe  $\leq 5\%$ )

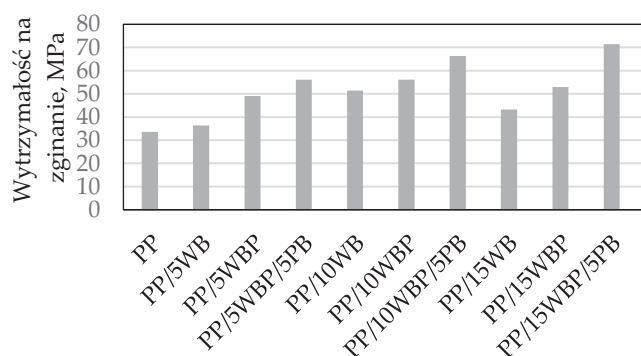
Table 2. Mechanical properties for static tensile and bending polypropylene/basalt fiber composites (standard deviation  $\leq 5\%$ )

Symbol próbki	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_B$ , %	$E_r$ , MPa	$\sigma_{fm}$ , MPa	$E_f$ , MPa
PP	32,3	120	1860	33,6	912
PP/5WB	29,3	11,0	1990	36,3	1150
PP/5WBP	33,8	8,5	2400	49,1	1930
PP/5WBP/5PB	39,0	4,7	2490	56,1	1790
PP/10WB	30,5	18,0	2460	51,4	2330
PP/10WBP	38,4	6,6	3120	56,1	2500
PP/10WBP/5PB	47,7	3,8	3150	66,3	2250
PP/15WB	30,7	11,1	3060	43,2	2140
PP/15WBP	41,5	5,0	3820	53,0	2410
PP/15WBP/5PB	50,1	3,4	3470	71,5	2530



Rys. 2. Wytrzymałość na rozciąganie kompozytów polipropylenu/włókno bazaltowe

Fig. 2. Tensile strength of polypropylene/basalt fiber composites

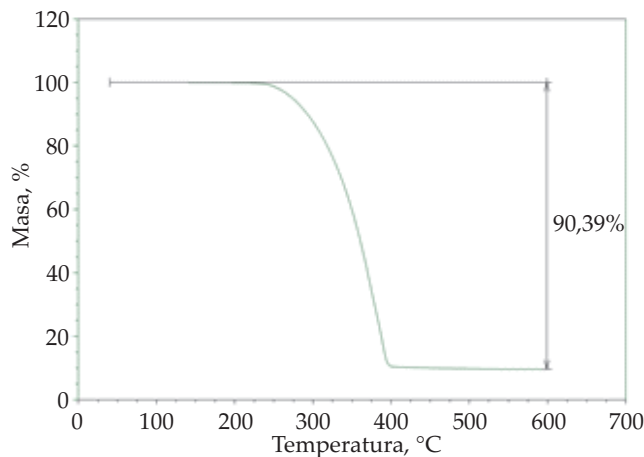


Rys. 3. Wytrzymałość na zginanie kompozytów polipropylenu/włókno bazaltowe

Fig. 3. Flexural strength of polypropylene/basalt fiber composites

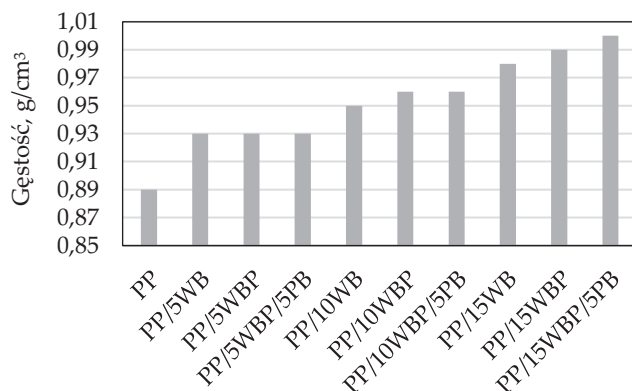
czysty PP, a wartości pozostałych właściwości, oprócz wydłużenia przy zerwaniu, są większe. Wprowadzenie do mieszanin kompatybilizatora dodatkowo poprawia wytrzymałość ( $\sigma_m$  i  $\sigma_{fm}$ ) oraz moduł  $E_v$ , zmniejsza natomiast nieznacznie  $E_f$  wytworzonych kompozytów

Wyniki badań zawartości włókien w otrzymanych kompozytach PP/włókno bazaltowe, uzyskane metodami



Rys. 4. Krzywa TGA kompozytu PP/10WB

Fig. 4. TGA curve of composite PP/10WB



Rys. 5. Gęstość litych kompozytów polipropylenu/włókno bazaltowe

Fig. 5. Density of solid polypropylene/basalt fiber composites

wypalania w piecu oraz analizy termogravimetrycznej TGA, a także gęstości przygotowanych kształtek zestawiono w tabeli 3.

Dodatkowo na rys. 4 przedstawiono wykres TGA zależności ubytku masy od temperatury kompozytu PP

T a b e l a 3. Zawartość włókien bazaltowych w otrzymanych kompozytach, gęstość kompozytów

T a b l e 3. Basalt fiber content in prepared composites, density of composites

Symbol próbki	Założona zawartość włókna, % mas.	Wyznaczona zawartość włókna po wypaleniu próbki % mas.	Wyznaczona zawartość włókna (TGA) % mas.	Gęstość g/cm <sup>3</sup>
PP	–	–	–	0,894
PP/5WB	5	4,79	5,33	0,930
PP/5WBP	5	6,16	6,41	0,932
PP/5WBP/5PB	5	4,52	4,53	0,931
PP/10WB	10	9,41	9,39	0,952
PP/10WBP	10	9,98	9,61	0,961
PP/10WBP/5PB	10	9,57	9,01	0,960
PP/15WB	15	14,05	13,87	0,981
PP/15WBP	15	14,87	14,85	0,990
PP/15WBP/5PB	15	15,47	15,82	1,001

**T a b e l a 4.** Wyniki analizy termicznej DSC otrzymanych kompozytów

**T a b l e 4.** DSC thermal analysis of prepared composites

Symbol próbki	$T_k$ , °C	$T_{H1}$ , °C	$T_{H2}$ , °C
PP	121,0	167,6	165,7
PP/5WB	120,2	169,1	165,4
PP/5WBP	119,9	170,3	166,6
PP/5WBP/5PB	119,7	168,1	167,0
PP/10WB	120,4	170,4	165,6
PP/10WBP	120,7	169,4	165,7
PP/10WBP/5PB	121,0	168,5	165,8
PP/15WB	119,7	171,3	166,8
PP/15WBP	120,4	169,6	165,9
PP/15WBP/5PB	121,0	168,4	165,5

z udziałem 10% mas. WB, a na rys. 5 zależność gęstości od składu kompozytów.

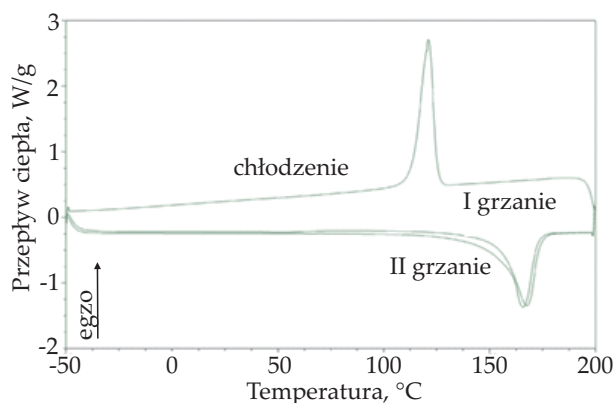
Wykazano, że rzeczywisty udział włókien w kompozytach jest zbliżony do założonego, co potwierdza, że metodami wytłaczania i wytryskiwania można otrzymać kompozyty polipropylenowe z założoną zawartością takich włókien. Gęstość wytworzonych kompozytów, zgodnie z przewidywaniami, zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości włókien w osnowie PP oraz z udziałem kompatybilizatora.

Wyniki badań wybranych próbek metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej zestawiono w tabeli 4 oraz na rys. 6–8.

Na podstawie termogramów wyznaczono: temperaturę krystalizacji PP ( $T_k$ ) – w procesie chłodzenia oraz temperaturę topnienia PP w I i II cyklu grzania ( $T_{H1}$  i  $T_{H2}$ ). Wyznaczona temperatura krystalizacji PP w kompozytach jest zbliżona do wartości  $T_k$  czystego PP i waha się w granicach od 120 do 121 °C. Temperatura topnienia ( $T_{H1}$ ) PP w kompozytach jest nieco wyższa niż polipropylenu (167,6 °C), natomiast wartości temperatury topnienia ( $T_{H2}$ ) PP w kompozytach są zbliżone do temperatury topnienia PP (165,7 °C) i mniejsze niż wartości  $T_{H1}$ . Dodatek do osnowy PP włókien z preparacją nie spowodował istotnych zmian wartości temperatury krystalizacji ( $T_k$ ) i topnienia ( $T_{H1}$  i  $T_{H2}$ ) w porównaniu z odpowiednimi wartościami temperatury kompozytów z włóknami bez preparacji. Podobnie, wprowadzenie kompatybilizatora do mieszaniny nie wpłynęło na zmiany właściwości termicznych wytworzonych kompozytów w odniesieniu do cech układu bez udziału kompatybilizatora (rys. 7, 8).

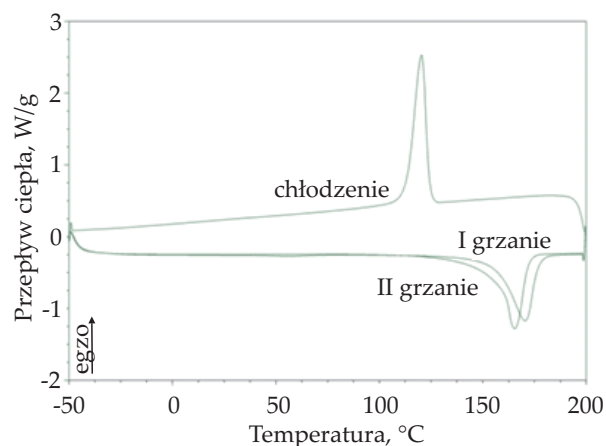
### Porowate kompozyty polipropylenowe

W celu optymalizacji parametrów procesu wtryskiwania układów spienionych i udziału poroforu, wytworzono kształtki polipropylenowe o zawartości 0,5; 1,0 i 1,5% mas. mikrosfer Expancel MB930 i zbadano ich właściwości fizyko-mechaniczne. Na podstawie wyznaczonych właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu



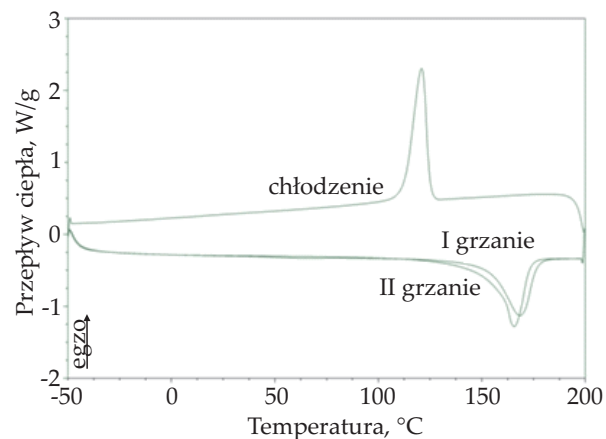
**Rys. 6.** Termogram DSC polipropylenu (cykl: I grzanie, chłodzenie, II grzanie)

**Fig. 6.** DSC polypropylene thermogram (cycle: I – 1st heating, cooling, II – 2nd heating)



**Rys. 7.** Termogram DSC kompozytu PP/10WB (cykl: I grzanie, chłodzenie, II grzanie)

**Fig. 7.** DSC thermogram for PP/10WB composite (cycle: I – 1st heating, cooling, II – 2nd heating)



**Rys. 8.** Termogram DSC kompozytu PP/10WBP/5PB (cykl: I grzanie, chłodzenie, II grzanie)

**Fig. 8.** DSC thermogram of the PP/10WBP/5PB composite (cycle: I – 1st heating, cooling, II – 2nd heating)

**T a b e l a 5.** Właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu i zginaniu spienionego PP i spienionych kompozytów poli-propylen/włókno bazaltowe (odchylenie standardowe  $\leq 5\%$ )

**T a b l e 5.** Mechanical properties for static tensile and bending of foamed PP and foamed polypropylene/basalt fiber composites (standard deviation  $\leq 5\%$ )

Symbol próbki	$\sigma_{M'}$ MPa	$\varepsilon_{B'}$ %	$E_t$ MPa	$\sigma_{f_{in'}}$ MPa	$E_f$ MPa	Gęstość, g/cm <sup>3</sup>
PP lity	34,0	110,0	1960	44,6	1460	0,904
PP/0,5MB	32,7	12,0	1860	45,6	1530	0,901
PP/1MB	32,8	12,1	1850	43,5	1410	0,898
PP/1,5MB	31,0	10,8	1770	43,2	1400	0,879
PP/5WBP/1,5MB	31,5	6,9	2360	48,6	1990	0,915
PP/10WBP/1,5MB	34,5	3,4	2820	51,3	2250	0,929
PP/15WBP/1,5MB	32,1	7,1	3040	50,8	2570	0,963

niu i zginaniu oraz gęstości (tabela 5) stwierdzono, że dodatek poroforu nie wpływa w istotny sposób na wartości  $\sigma_m$  i  $\sigma_{fm}$  oraz  $E_t$  i  $E_f$  czystego PP (zmniejsza je tylko nieznacznie), natomiast wraz ze wzrostem udziału mikrosfer znacznie zmniejsza się wartość  $\varepsilon_B$  otrzymanych kompozytów oraz ich gęstość, co świadczy o powstaniu struktury porowatej. Po dokonaniu oceny organoleptycznej (wybrano kształtki o zadowalającym stopniu spienienia i regularnym, pełnym kształcie) oraz przeanalizowaniu otrzymanych wyników, do dalszych badań wytworzono kompozyty porowate PP o zawartości 5, 10 i 15% mas. włókien bazaltowych z udziałem środka preparującego i z dodatkiem 1,5% mas. (w odniesieniu do sumarycznej masy układu) środka spieniającego. Wyniki badań wytrzymałości przy statycznym rozciąganiu i zginaniu oraz gęstości badanych próbek zamieszczono w tabeli 5.

Stwierdzono, że wartości wytrzymałości na rozciąganie kompozytów porowatych i litych są podobne, natomiast wraz ze wzrostem udziału włókna w kompozycie porowatym zauważalnie zwiększa się wytrzymałość na zginanie i moduły sprężystości ( $E_t$  i  $E_f$ ), a wartość wydłużenia przy zerwaniu spienionych kompozytów wyraźnie się zmniejsza. Kompozyty porowate, zgodnie z przewidywaniami, wykazują mniejszą gęstość niż kompozyty lite.

## PODSUMOWANIE

Odpowiedni dobór parametrów technologicznych pozwala na wytworzenie porowatych kompozytów poli-propylenowych wzmocnionych ciętymi włóknami bazaltowymi w procesie wtryskiwania z udziałem fizycznego poroforu w postaci mikrosfer ekspandujących. Kompozyty PP o strukturze porowatej wykazują nieznacznie lepsze właściwości mechaniczne niż kompozyty PP niespienione, natomiast wyraźnie korzystniejsze niż czysty PP.

Naniesiony na włókna środek preparacyjny (dostosowany do osnowy PP) w istotnym stopniu poprawia właściwości mechaniczne kompozytów w porównaniu z właściwościami kompozytów zawierających włókna

niepreparowane, przy czym zmiany te są wyraźniejsze wraz ze wzrostem udziału włókien, natomiast obecny w układzie kompatybilizator dodatkowo je wzmacnia. Świadczyć to może o odpowiednim doborze środka do preparacji powierzchni włókien. Bazaltowe włókna wykazują dobrą adhezję do polipropylenowej osnowy, poprawioną w wyniku wprowadzenia kompatybilizatora.

Mimo że właściwości mechaniczne, w tym wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, porowatych kompozytów PP z włóknami bazaltowymi pogorszyły się w porównaniu z właściwościami kompozytu litego, to w odniesieniu do czystego PP zaobserwowane zmiany są korzystne, zwłaszcza w wypadku modułu sprężystości przy rozciąganiu i zginaniu. Ważne są także różnice gęstości litych i porowatych kompozytów w odniesieniu do gęstości czystego polipropylenu.

Wytworzone porowate kompozyty PP z udziałem włókien bazaltowych wykazywały o ok. 10% mniejszą gęstość niż analogiczne kompozyty lite, przy czym zarówno lite, jak i spienione kompozyty charakteryzowały się większą gęstością niż czysty lity polipropylen, zwiększającą się wraz ze wzrostem udziału włókien w osnowie PP. Widoczne, brązowe zabarwienie kształtek kompozytów PP, pogłębiające się ze zwiększeniem zawartości włókien bazaltowych, może jednak stanowić pewne ograniczenie w zastosowaniach tego materiału.

## LITERATURA

- [1] Królikowski W.: „Polimerowe kompozyty konstrukcyjne”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012, str. 52.
- [2] Regar M.L, Amjad A.I.: *Tekstilec* **2016**, 59, 321.  
<http://dx.doi.org/10.14502/Tekstilec2016.59.321-334>
- [3] Kunal S.: *International Journal of Textile Science* **2012**, 1, 19.  
<http://dx.doi.org/10.5923/j.textile.20120104.02>
- [4] Pak S., Park S., Song Y.S. i.in.: *Composite Structures* **2018**, 193, 73.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.020>
- [5] Czigány T.: *Composites Science and Technology* **2006**, 66, 3210.

- <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.07.007>
- [6] Sapor S.: *InstalReporter* **2013**, 7, 35.
- [7] Ehrenstein G.W., Brocka-Krzemińska Ż.: „Materiały polimerowe. Struktura, właściwości, zastosowanie”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016, str. 161.
- [8] Aji A., Utracki L.A.: *Polymer Engineering and Science* **1996**, 36, 1574.  
<https://doi.org/10.1002/pen.10554>
- [9] Aji A., Utracki L.A.: *Progress in Rubber and Plastics Technology* **1997**, 13, 153.
- [10] Janik J., Lenart S., Królikowski W., Penczek P.: *Polimery* **2004**, 49, 432.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2004.432>
- [11] Kuciel S., Liber-Kneć A., Zajchowski S.: *Polimery* **2010**, 55, 718.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2010.718>
- [12] Janik J.: *Przemysł Chemiczny* **2010**, 12, 1489.
- [13] Kozłowski M., Kozłowska A., Frąckowiak S.: *Polimery* **2010**, 55, 726.  
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2010.726>
- [14] AkzoNobel: “Blowing Agents – Microspheres Expancel” (online).  
<https://expancel.akzonobel.com/blowing-agents>  
(data dostępu: 11.12.2017)
- [15] Bouix R., Viot P., Lataillade J.L.: *International Journal of Impact Engineering* **2009**, 36, 329.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.11.007>
- [16] Maheo L., Viot P.: *International Journal of Impact Engineering* **2013**, 53, 84.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.011>
- [17] Wang L., Hikima Y., Ishihara S., Ohshima M.: *Polymer* **2017**, 128, 119.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2017.09.025>
- [18] Fan-Long J., Zhao M., Park S.: *Polymers* **2019**, 11, 1354.  
<http://dx.doi.org/10.3390/polym11060953>
- [19] Matkó S., Anna P, Marosi G. i.in.: *Macromolecular Symposia* **2003**, 202, 255.  
<https://doi.org/10.1002/masy.200351222>
- [20] Ignaczak W., Sui X., Kellersztein I. i.in.: *Polymer International* **2018**, 67, 414.  
<https://doi.org/10.1002/pi.5522>
- [21] Dębicka I.: praca magisterska „Wytwarzanie kompozytów termoplastycznych wzmocnionych”, IP WTiCh ZUT w Szczecinie, 2017.
- [22] Rajewska M.: praca magisterska „Optymalizacja parametrów wytwarzania spienionego polipropylenu, wzmocnionego włóknem ciętym”, IP WTiCh ZUT w Szczecinie, 2018.

Otrzymano 9 X 2019 r.

#### W kolejnym zeszycie ukaza się m.in. następujące artykuły:

- J. Krajenta, A. Pawlak, A. Galeski – Kompozyty w pełni polimerowe – nowe podejście z użyciem rozplątanych częściowo krystalicznych polimerów. Cz. II. Otrzymywanie kompozytów zawierających częściowo rozplątany polilaktyd (j. ang.)
- K. Gziut, A. Kowalczyk – Wpływ fotoinicjatorów na właściwości poliakrylanowych syropów i klejów samoprzylepnych (j. ang.)
- P. Imiolek, K. Kasprowicz, J. Laska – Antystatyczne folie polietylenowe modyfikowane grafitem ekspandowanym – aspekty technologiczne (j. ang.)
- R. Oliwa, K. Bulanda, M. Oleksy, P. Ostyńska, G. Budzik, M. Płocińska, S. Krauze – Odporność na płomień oraz właściwości mechaniczne kompozytów proszkowej żywicy epoksydowej wzmocnionej recyklatem laminatu z włóknem szklanym (j. ang.)
- W. Terlikowski, M. Gregoriou-Szczepaniak, M. Kędziński, E. Sobczyńska, K. Wasilewski – Materiały polimerowe wykorzystywane do konserwacji zabytkowych konstrukcji kamiennych (j. ang.)
- K. Lewandowski, K. Skórczewska, K. Piszczek, M. Manikowski, J. Mirowski – Modyfikacja nieplastyfikowanego poli(chlorku winylu) do aplikacji w trójwarstwowych rurach paszociągowych
- O. Markowska, T. Markowski, M. Sobczyk – Analiza właściwości mechanicznych kompozytów polimerowych przeznaczonych do produkcji części maszyn stosowanych jako zamienniki elementów otrzymywanych z metali (j. ang.)