

Wiesław FRĄCZ, Grzegorz JANOWSKI

Politechnika Rzeszowska, Katedra Przeróbki Plastycznej, ul. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów,  
e-mail: wf@prz.edu.pl

## Kompozyty WPC wytwarzane w procesie porowania mikrokomórkowego – prognozowanie i ocena właściwości mechanicznych

**Streszczenie:** W pracy przeprowadzono symulacje numeryczne procesu wtryskiwania z porowaniem mikrokomórkowym wyprasek z kompozytu polimerowego WPC (drewno – polimer) dla zmiennej zawartości gazu. W celu oceny właściwości trójfazowej struktury kompozytu (matryca polipropylenowa, 10% włókien drewna sosnowego oraz 1-15% porów) wykonano analizę mikrostrukturalną oraz przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe z użyciem modelu homogenizacji Mori-Tanaka. Analizowany wytwór (próbka do rozciągania zgodnie z PN-ISO 527-1) poddano symulacji obciążenia w programie Ansys, określając wpływ zmiennego stopnia porowania wytworu na jego właściwości wytrzymałościowe. Ponadto w pracy przedstawiono komputerową wizualizację przewidywanej, obliczonej mikrostruktury dla kompozycji sporowanego WPC, przy zmiennym stopniu porowości struktury kompozytu oraz obliczone dla badanych kompozytów macierze sztywności.

**Słowa kluczowe:** wtryskiwanie porujące, kompozyty mikroporowate, symulacje numeryczne, Digimat, Ansys, homogenizacja Mori-Tanaka

### WOOD-POLYMER COMPOSITES WITH MICROCELLULAR FOAMING – FORECASTING AND EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES

**Abstract:** The numerical simulations of injection molding process with microcellular foaming for WPC (wood – polymer composite) was carried out in this work for variable volume content of gas. In order to evaluate the properties of three-phase composite structure (polypropylene matrix, 10% of wood fibers from pine and 1-15% of pores) microstructural analysis was performed and the strength calculations were carried out using the Mori-Tanaka homogenization model. The analyzed product (the dumbbell for tensile testing, according to PN-ISO 527-1) was used to tensile testing simulation in Ansys commercial code, determining the influence of variable degree of foaming on its mechanical properties. In addition, the paper presents the computer visualization for the expected, calculated microstructure of foamed WPC composite (with varying degrees of porosity of the composite structure) and stiffness matrix calculated for the tested composites.

**Keywords:** microcellular injection molding process, microporous composites, numerical simulations, Digimat, Ansys, Mori-Tanaka homogenization method.

### WPROWADZENIE

Wtryskiwanie porujące to proces polegający na wytwarzaniu wytworów o strukturze komórkowej. Metoda ta polega na wtryskiwaniu mieszaniny tworzywa polimerowego i gazu do formy wtryskowej [1, 2]. Główna odmiana wtryskiwania porującego została opracowana i rozwijana pod nazwą Mucell®. Proces ten

charakteryzuje się tym, iż do uplastycznionego tworzywa są dodawane pod ciśnieniem niestabilne gazy (dwutlenek węgla lub azot) w stanie nadkrytycznym [3, 4].

Wyróżnia się cztery główne etapy procesu porowania mikrokomórkowego wyprasek (Rys. 1) [5, 6]:

– dyfuzję gazów w uplastycznionym tworzywie polimerowym,

- wytwarzanie zarodków porów – tzw. nukleację, wskutek gwałtownej zmiany stanu termodynamicznego materiału,
- powiększanie się porów, etap, w którym ich wielkość oraz ilość jest zależna głównie od gradientu ciśnienia i temperatury, właściwości lepko-sprężystych polimeru oraz zawartości gazu,
- kształtowanie wyrobu w gnieździe formującym w wyniku obniżania temperatury.

$$D = d_1 e^{\left(\frac{d_2}{T}\right)} \quad (2)$$

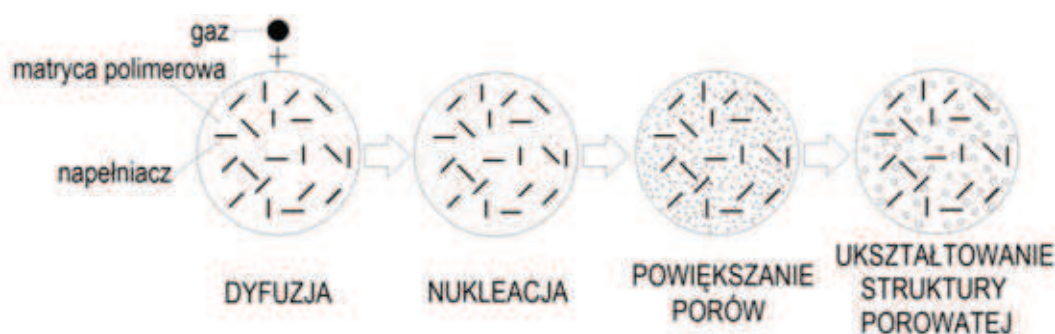
gdzie:

$D$  – współczynnik dyfuzji,

$T$  – temperatura,

$d_1, d_2$  – współczynniki stałe.

W przypadku, gdy  $d_2 = 0$ , współczynnik dyfuzji  $D$  będzie miał wartość stałą równą  $d_1$ .



Rys. 1. Schemat procesu porowania kompozytu polimer – napełniacz

Fig. 1. Diagram of microcellular foaming process for polymer – fillers composites

Od wielu lat istnieje możliwość wykonywania analiz numerycznych procesu Mucell® za pomocą specjalistycznego oprogramowania komercyjnego. W obliczeniach tego procesu uwzględnia się m. in. zjawiska rozpuszczalności i dyfuzji gazu oraz lepkości mieszaniny gaz-polimer [7].

Rozpuszczalność gazu definiuje się najczęściej równaniem:

$$k = k_1 e^{\frac{k_2}{T}} \quad (1)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik rozpuszczalności,

$T$  – temperatura,

$k_1, k_2$  – współczynniki stałe.

W przypadku, gdy  $k_2 = 0$ , współczynnik rozpuszczalności  $k$  będzie miał wartość stałą równą  $k_1$ .

Równanie dyfuzji gazu określa stan, w którym, po wtrysku kompozycji do formy, gaz rozpuszczony w uplastycznionym tworzywie dyfunduje w głąb materiału, następuje nukleacja mikroporów oraz ich rozrost:

Model lepkości mieszaniny gaz-polimer w technologii spieniania mikrokomórkowego ma postać:

$$\eta = \eta_r (1 - \phi)^{v_1} \exp(v_2 c + v_3 c^2) \quad (3)$$

gdzie:

$\eta$  – lepkość mieszaniny gaz-polimer,

$\eta_r$  – lepkość polimeru,

$\phi$  – udział objętościowy pęcherzy gazu,

$c$  – stężenie początkowe gazu,

$v_1, v_2, v_3$  – współczynniki stałe.

Uwzględnienie właściwości złożonego kompozytu w obliczeniach strukturalnych konstrukcji jest możliwe za pomocą metod homogenizacji. Stosowane są w tej dziedzinie zarówno metody analityczne jak i numeryczne. Najczęściej stosowanym w obliczeniach kompozytów jest model Mori-Tanaka. Model ten jest jedną z metod homogenizacji skonstruowanej według tzw. zagadnienia pojedynczego wtrącenia w nieskończonym, jednorodnym ośrodku ciągłym. W modelu tym średnie wartości tensorów naprężenia i odkształ-

cenia wtrąceń i matrycy odnoszą się do tensorów naprężeń i odkształceń w skali makro poprzez tensor lokalizacji odkształcenia.

$$B^{\varepsilon} = H^{\varepsilon}(I, C_{\nu}, C_1) \quad (4)$$

gdzie:

$B^{\varepsilon}$  – tensor lokalizacji odkształceń kompozytu,

$H^{\varepsilon}$  – tensor lokalizacji odkształceń pojedynczego wtrącenia,

$I, C_{\nu}, C_1$  – macierze sztywności matrycy i wtrąceń,

Powiązanie matematyczne między wtrąceniem a matrycą daje uśredniony efekt interakcji między fazami [8, 9].

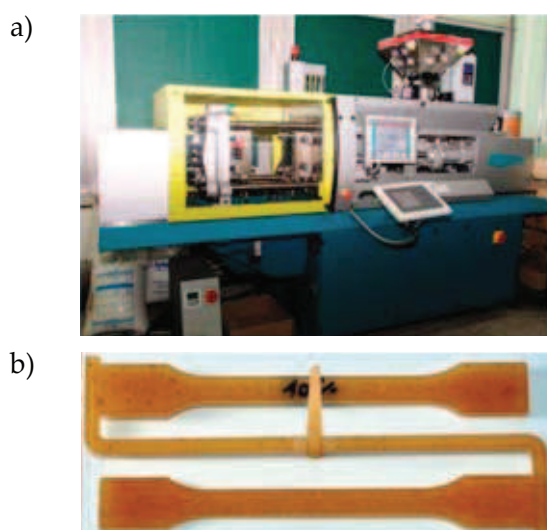
### CEL PRACY

Ciągle powiększający się obszar zastosowań polimerowych materiałów porowatych tworzy potrzeby wykonywania symulacji numerycznych procesu ich formowania, jak również zachowania się tego typu wyrobów podczas użytkowania. Poprawność wyników takich analiz zależy głównie od dokładności opisu właściwości składników kompozytów i ich mikrostruktury [10]. Istotną kwestią jest tutaj konieczność przewidywania właściwości takich materiałów porowatych biorąc pod uwagę ich niejednorodną strukturę. W celu przeprowadzenia tego typu zaawansowanych analiz stosowane są często metody homogenizacji, zarówno numeryczne jak i analityczne.

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości wtryskiwania z porowaniem mikrokomórkowym kompozytu WPC w kontekście oceny właściwości wytrzymałościowych, otrzymanej trójfazowej kompozycji wytworu dla różnej zawartości porów w strukturze kompozytu. W celu łatwej weryfikacji strukturalne analizy wytrzymałościowe przeprowadzono numerycznie z uwzględnieniem złożonej struktury kompozytu na przykładzie modelu próbki wykorzystywanej w statycznej próbie rozciągania.

### BADANIA EKSPERYMENTALNE

W badaniach eksperymentalnych wytworzono kompozyt WPC, wyznaczono jego właściwości przetwórcze oraz wykonano analizę wytrzymałościową. Jako matrycę polimerową w kompozycie zastosowano polipropylen o nazwie handlowej Moplen HP 648T, zaś jako napelniacz wykorzystano włókno drzewne (WD) z drewna sosnowego w ilości 10% o nazwie handlowej Arboceł C350SR. Kompozyt wytwarzano za pomocą wylączarki laboratoryjnej firmy Zamak (model EHP-25E).



Rys. 2. Stanowisko badawcze i próbki: a) wtryskarka DrBoy 55E z formą wtryskową wyposażoną w system pomiaru ciśnienia i temperatury, b) wypraski otrzymane w procesie formowania wtryskowego kompozytu WPC 10%WD

Fig. 2. The test stand and specimens: a) The DrBoy 55E injection molding machine with the injection mold equipped with pressure and temperature measuring system, b) samples made of WPC with 10% wood fibers by means injection molding process.

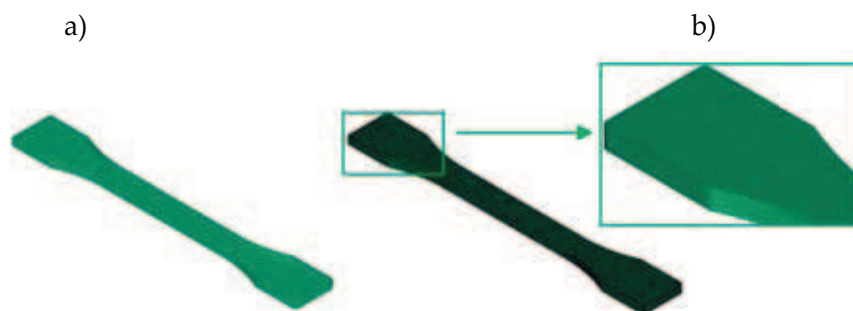
Z uwagi na fakt, iż standardowe pomiary reometryczne nie powiodły się z powodu niejednorodności struktury kompozytu, w celu określenia krzywej lepkości wykorzystano specjalnie zaprojektowaną do tego formę wtryskową z czujnikami ciśnienia oraz temperatury [11]. Przeprowadzono próby wtryskiwania dla natę-

żeń przepływu: 10, 20, 40, 60, 80, 100 cm<sup>3</sup>/s, oraz temperatury tworzywa: 170, 180, 190 i 200 °C. Na podstawie wskazań w/w czujników oraz znajomości wymiarów gniazda formującego obliczono lepkość kompozytu dla zmiennych procesu tj. np. szybkości ścinania. Przebieg krzywych lepkości kompozytu WPC 10%WD obliczono za pomocą siedmioparametrowego modelu Cross-WLF. Charakterystykę pVT wyznaczono za pomocą reometru SmartRheo 2000 firmy Instron.

Próbki przeznaczone do badań w statycznej próbie rozciągania zgodne z normą PN ISO 527 wytworzono przy zastosowaniu wtryskarki DrBoy 55E (Rys. 2). Badania wytrzymałościowe przeprowadzono dla próbek, które rozciągano z prędkością 50 mm/min na maszynie wytrzymałościowej Zwick Roell Z100.

### ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU WTRYSKIWANIA PORUJĄCEGO

Przeprowadzenie symulacji wtryskiwania dla kompozytu drewno-polimer obejmowało etapy: projekt modelu próbki do próby rozciągania w programie NX, dyskretyzację modelu za pomocą trójkątnych elementów skończonych typu cienka powłoka w technologii Dual Domain (Rys. 3), wprowadzenie warunków początkowych i brzegowych, wykonanie obliczeń numerycznych w programie Autodesk Moldflow Insight 2013 (AMI 2013) oraz interpretację wyników. Głównym warunkiem przeprowadzenia poprawnych analiz było wprowadzenie do programu danych materiałowych – w tym wcześniej wyznaczonej eksperymentalnie charakterystyki reologicznej oraz termodynamicznej [11].



Rys. 3. Próbką: a) model geometryczny próbki, b) model zdyskretyzowany za pomocą ok. 100 tys. ES typu cienka powłoka.  
Fig. 3. The specimen: a) geometric model, b) model discretized by approx. 100 thousand FE of thin shell type.

**Tab. 1. Parametry technologiczne stosowane w analizach numerycznych wtryskiwania z porowaniem mikrokomórkowym**

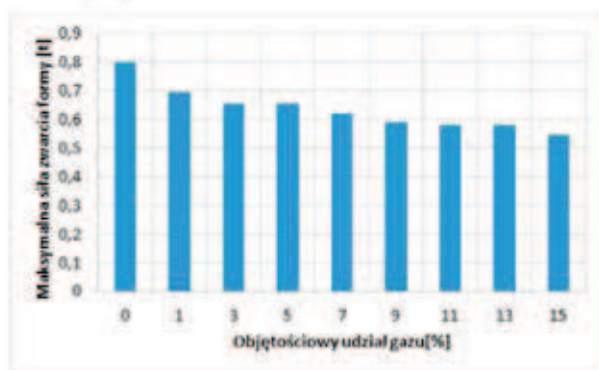
**Tab. 1. The processing parameters used in numerical analysis of microcellular foaming process.**

Parametr	Jednostka	Wartość
Temperatura formy	°C	30
Temp. uplastycznionego tworzywa	°C	200
Stopień wypełnienia gniazda w chwili rozpoczęcia wzrostu porów	%	85–99
Ilość porów w danej objętości tworzywa	cm <sup>-3</sup>	2*10 <sup>5</sup>
Ilość gazu wstępnie rozpuszczona w tworzywie	%	0,8
Początkowa średnica porów	mm	0,01
Rodzaj gazu	-	CO <sub>2</sub>



Wykonano kilkanaście ewaluacji komputerowych dla standardowego procesu wtryskiwania kompozytu bez porowania oraz z porowaniem, dla zmiennej objętości gazu w zakresie 0–15% objętościowo, dla parametrów zestawionych w tabeli 1.

Analizując otrzymane wyniki zauważyć można, iż ze wzrostem ilości gazu zmniejsza się wartość maksymalnej siły zwarcia formy, nawet o ponad 30% w stosunku do kompozytu bez zawartości gazu porującego (Rys. 4). Podobna tendencja jest zauważalna w przypadku ciśnienia wtrysku tj. następuje obniżenie jego wartości wraz ze wzrostem objętościowego udziału gazu (Rys. 5).



Rys. 4. Zmiany maksymalnej siły zwarcia formy przy zmiennej objętości gazu

Fig. 4. Changes of maximum mold clamping force for variable gas volume



Rys. 5. Zmiany ciśnienia wtrysku w zależności od objętości gazu

Fig. 5. Changes of injection pressure for variable gas volume

Jednym z użytecznych aspektów wtryskiwania porującego jest obniżenie masy otrzymanego wytworu. W przedstawionych analizach numerycznych uzyskano maksymalnie o 25% niższą masę wypraski (Rys. 6).



Rys. 6. Zmiana masy wytworu dla zmiennej objętości gazu

Fig. 6. The change of specimen mass for variable gas volume

## PROGNOZOWANIE WŁAŚCIWOŚCI

W pracy wykonano prognozowanie właściwości struktury kompozytów WPC przy zmiennym udziale procentowym gazu 1–15%. W tym celu przeprowadzono obliczenia w programie Digimat MF ver. 2016.1. Wprowadzono dane wytrzymałościowe poszczególnych faz kompozytu i wykonano homogenizację analityczną za pomocą modelu Mori-Tanaka.

Otrzymano dużą zgodność właściwości między wynikami z eksperymentu oraz po homogenizacji dla kompozytu o strukturze bez porowatości (Tab. 2). Zgodność wyników zachęciła do przeprowadzenia kolejnych analiz mikrostrukturalnych dla kompozytu ze zmienną ilością porów. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem ilości gazu pogarszają się właściwości wytrzymałościowe materiału. Dla każdego analizowanego materiału obliczono macierze sztywności, niezbędne w obliczeniach strukturalnych kompozytów (Rys. 7).

Tab. 2. Zestawienie właściwości kompozytów prognozowanych na podstawie homogenizacji wg modelu Mori-Tanaka

Tab. 2. The list of predicted composites properties based on Mori-Tanaka homogenization model

	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona [-]	Moduł Kirchhoffa [MPa]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]
WPC 10%WD – eksperyment	1666,4	-	-	1058
WPC 10%WD	1708,0	0,3896	614,5	1056
WPC 10%WD + 1%porów	1674,4	0,3873	603,5	1045
WPC 10%WD + 3%porów	1609,2	0,3827	581,9	1024
WPC 10%WD + 5%porów	1546,0	0,3783	561,0	1003
WPC 10%WD + 7%porów	1486,1	0,3740	540,8	982
WPC 10%WD + 9%porów	1427,8	0,3600	521,1	961
WPC 10%WD + 11%porów	1371,6	0,3659	502,1	940
WPC 10%WD + 13%porów	1317,4	0,3621	483,6	919
WPC 10%WD + 15%porów	1265,1	0,3584	465,6	898

a)

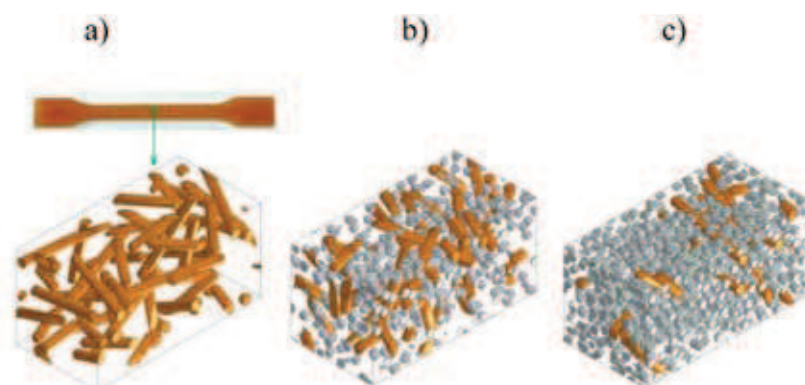
	11	22	33	12	23	13
11	3398,8	2169,7	2169,7	0	0	0
22	2169,7	3398,8	2169,7	0	0	0
33	2169,7	2169,7	3398,8	0	0	0
12	0	0	0	614,54	0	0
23	0	0	0	0	614,54	0
13	0	0	0	0	0	614,54

b)

	11	22	33	12	23	13
11	2110,1	1178,9	1178,9	0	0	0
22	1178,9	2110,1	1178,9	0	0	0
33	1178,9	1178,9	2110,1	0	0	0
12	0	0	0	465,63	0	0
23	0	0	0	0	465,63	0
13	0	0	0	0	0	465,63

Rys. 7. Macierze sztywności dla materiałów: a) WPC 10% WD, b) WPC 10%WD z 15% udziału obj. gazu.

Fig. 7. The materials stiffness matrices for: a) WPC 10% WD, b) WPC 10% of wood fiber with a 15% of gas.



Rys. 8. Wizualizacja mikrostruktury kompozytu: a) dla kompozytu bez porów wraz z przedstawieniem wytworzonej eksperymentalnie próbki, b) dla kompozytu z 7% porów, c) dla kompozytu z 15% porów w strukturze materiału.

Fig. 8. The composite microstructure visualization for: a) non-porous composite together with specimen produced experimentally, b) composite with 7% of pores, c) composite with 15% of the pores in material structure.

Za pomocą programu Digimat ver. 2016.1 przedstawiono prognozowaną wizualizację mikrostruktury kompozytu. W tym celu przyjęto m.in. dane geometryczne faz kompozytu: średnia długość włókien – 110  $\mu\text{m}$  oraz średnia średnica porów – 0,01 mm. Określono wymiary Reprezentatywnego Elementu Objętościowego (0,15x0,3x0,15mm). Efekty wykonanej wizualizacji przedstawiono na rys. 8.

### ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA

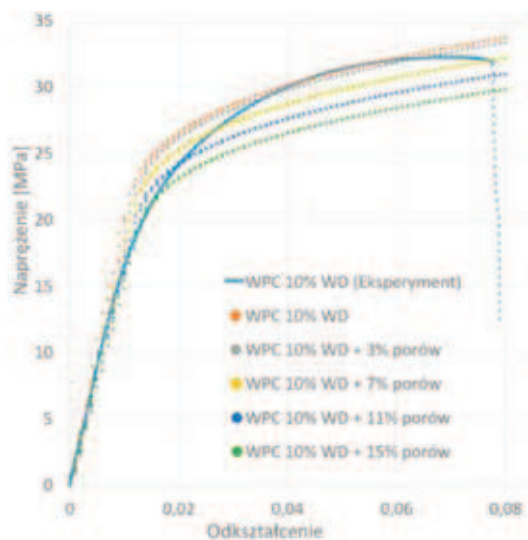
W ramach analizy strukturalnej wykonano analizę numeryczną testu jednoosiowego rozciągania przy uwzględnieniu zaawansowanej struktury kompozytu. W tym celu wykorzystano wtyczkę (ang. Plug-In) programu Digimat CAE działającą w środowisku oprogramowania Ansys, co pozwoliło na wprowadzenie danych materiałowych po wykonanej homogenizacji analitycznej. W celu weryfikacji wyników wykonano próbę jednoosiowego rozciągania próbki wykonanej z kompozytu bez udziału porów w strukturze materiału. Duża zgodność otrzymanych wstępnie wyni-

ków stała się przyczyną do wykonania kolejnych analiz numerycznych przy wzrastającym udziale gazu (Rys. 9). Otrzymane charakterystyki wskazują na pogarszanie właściwości wytrzymałościowych przy wzrastającym udziale gazu w strukturze kompozytu.

### WNIOSKI

Przeprowadzone analizy numeryczne pozwalają prognozować właściwości wytrzymałościowe analizowanego kompozytu WPC z 10% udziałem objętościowym włókna drzewnego. Wzrost udziału porów, powstałych w strukturze kompozytu w procesie porowania mikrokomórkowego metodą Mucell®, oceniany w zakresie 0–15% objętościowo, jest przyczyną zmniejszenia maksymalnych naprężeń o ok. 14%.

Zastosowanie modelu homogenizacji Mori-Tanaka w kompozycie trójskładnikowym daje dobrą zgodność wyników. Co prawda wyniki te zostały zweryfikowane tylko w zakresie 0% udziału porów, niemniej jednak zakłada się, że będą one dobrze korelować z danymi eksperymentalnymi, które nie zostały jeszcze uzyskane.



Rys. 9. Charakterystyki wytrzymałościowe ze statycznej próby 1-osiowego rozciągania kompozytów WPC dla zmiennej ilości (0–15)% gazu.

Fig. 9. The strength characteristics for WPC composites with variable amounts (0–15)% of gas obtained from uniaxial tension test.

Stosowanie metod homogenizacji w strukturalnych analizach numerycznych pozwala prognozować i lepiej opisywać właściwości materiałowe kompozytów dzięki możliwości uwzględnienia ich niejednorodności struktury.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bociąga E. *Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
2. Palutkiewicz P., Wawrzyniak J. *Wpływ warunków uplastyczniania na właściwości i strukturę wyprasek z PE-HD z porofozem*, *Przetwórstwo Tworzyw* 2012, 18(5), 489–494.
3. Bociąga E., *Wtryskiwanie mikroporujące (MuCell). Praca zbiorowa pt. Postęp w przetwórstwie materiałów polimerowych*, (red. Koszkuł J., Bociąga E.), CWA Regina Poloniae, Częstochowa 2006.
4. Steinbichler G. *Nowa technologia spieniania drobnokomórkowego wyprasek – MuCell. W: Technologie wtryskiwania, jakość i efektywność*, Wydawnictwo Plastech, Warszawa 2000.
5. Macyszyn J., Kozłowski M. *Tworzywa termoplastyczne o strukturze komórkowej*, <http://www.eko-dok.pl/2012/40.pdf> (01.12.2016r.)
6. Bociąga E., Palutkiewicz P. *Wtryskiwanie mikroporujące*, *Przetwórstwo Tworzyw* 2013, 19(4), 309–317.
7. Palutkiewicz P. *Symulacje komputerowe procesu wtryskiwania porującego*, *Polimery* 2015, 60(2), 132–143.
8. Łydzba, D. *Zastosowania metody asymptotycznej homogenizacji w mechanice gruntów i skał*, *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej. Monografie* 2002, 74(23), 274–274.
9. *Digimat – User's Manual Release 2016.1 – June 2016*, e-Xstream Engineering, Belgium 2016.
10. Żelazek K., Sikora J. W., Gajdos I. *Właściwości i przetwarzalność kompozytów polipropylenowych a rodzaj i ilość napętniacza. Cz. 1, Charakterystyka badań*, *Przetwórstwo Tworzyw* 2014, 20(4), 276–283.
11. Frącz W., Janowski G. *Ocena możliwości wtryskiwania kompozytu WPC w produkcji elementów wyposażenia wnętrza autobusu w oparciu o symulacje numeryczne procesu*, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 2015, 16(7–8), 48–52.

## PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach People Programme (Marie Curie International Research Staff Exchange) of the European Union's Seventh Framework Programme FP7/2007–2013/ – grant n° PIRSES-GA-2013–610547.

Publikację przyjęto do druku 16–12–2016