

Analiza właściwości mechanicznych kompozytów PA6 GF30 o strukturze porowatej

Natalia Konczal^{1*}, Bartosz Nowinka², Mateusz Rojewski³, Dariusz Sykutera⁴

¹ Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: natalia.konczal@pbs.edu.pl

² Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: bartosz.nowinka@pbs.edu.pl

³ Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: mateusz.rojewski@pbs.edu.pl

⁴ Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: dariusz.sykutera@pbs.edu.pl

* Autor korespondencyjny: natalia.konczal@pbs.edu.pl

Streszczenie: Celem badań było eksperymentalne wyznaczenie zależności pomiędzy rodzajem i zawartością dozowanego środka porotwórczego a właściwościami wyprasek wtryskowych z poliamidu 6 zawierającego 30% mas. krótkich włókien szklanych. Eksperyment zrealizowano z użyciem standardowej wtryskarki do tworzyw termoplastycznych wraz z urządzeniami peryferyjnymi. Jako modyfikator poliamidowej osnowy zastosowano porofory chemiczne Expancel 950 MB 80 oraz PLASTRON NUC C20-N. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że zarówno ilość, jak i rodzaj dozowanego środka porotwórczego wpływają na właściwości badanych wyprasek. Stwierdzono, iż zwiększenie ilości środków porujących dozowanych do kompozytów przyczynia się do redukcji masy wyprasek oraz obniżenia ich wytrzymałości na rozciąganie. Zaobserwowano także obniżenie modułu sprężystości wzdłużnej porowatych wyprasek poliamidowych w porównaniu z postacią litą. Wykazano również, że w zależności od rodzaju i ilości użytego środka porującego zmianie ulega udarność kompozytu PA6 GF30.

Słowa kluczowe: porofory, wtryskiwanie porujące, poliamid 6, struktura porowata

Analysis of the mechanical properties of PA6 GF30 porous composites

Natalia Konczal^{1*}, Bartosz Nowinka², Mateusz Rojewski³, Dariusz Sykutera⁴

¹ Bydgoszcz University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: natalia.konczal@pbs.edu.pl

² Bydgoszcz University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; bartosz.nowinka@pbs.edu.pl

³ Bydgoszcz University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: mateusz.rojewski@pbs.edu.pl

⁴ Bydgoszcz University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: dariusz.sykutera@pbs.edu.pl

* Correspondent author: natalia.konczal@pbs.edu.pl

Summary: The aim of the research was to experimentally determine the relationship between the type and content of the blowing agent and the properties of injection moldings made of polyamide 6 containing 30 wt.% of short glass fibers. The experiment was carried out using a standard injection molding machine equipped with peripheral devices. Expancel 950 MB 80 and PLASTRON NUC C20-N chemical blowing agents were used as a modifier of the polyamide matrix. Based on conducted tests, it was shown that both the amount and type of the blowing agent play an important role in the properties of the tested moldings. It was found that increasing the amount of blowing agents dosed to the PA6 GF30 caused the weight reduction of the moldings and decrease of their tensile strength. A reduction in the modulus of elasticity of foamed polyamide moldings was also observed compared to the solid molded parts. It has also been shown that the impact strength of the PA6 GF30 composite changes depending on the type and amount of the blowing agent used.

Key words: blowing agents, microcellular injection moulding, polyamide 6, cellular structure

1. Wstęp

Z roku na rok obserwuje się wzrastające zapotrzebowanie na materiały polimerowe. Wiąże się to z rozszerzeniem obszaru wykorzystania tego surowca na wiele gałęzi przemysłu. W 2019 roku na świecie przetworzono 368 mln ton tworzyw sztucznych [16]. Obecne trendy dotyczące redukcji śladu węglowego oraz wymagania kluczowych branż wykorzystujących tworzywa konstrukcyjne wymuszają modyfikację tych materiałów poprzez stosowanie szeregu dodatków. Takie działania ma na celu uzyskanie wymaganych właściwości użytkowych przy jednoczesnej redukcji masy wyrobów. Jedną z metod wytwarzania struktur lekkich jest modyfikacja procesu przetwórczego w kierunku otrzymywania wyprasek porowatych. Proces ten polega na wprowadzeniu chemicznego środka porotwórczego (porowanie chemiczne) lub gazu obojętnego w stanie nadkrytycznym (porowanie fizyczne) do układu uplastyczniającego wtryskarki lub wytłaczarki. Zalety wytwarzania elementów porowatych – oprócz redukcji masy – to niska gęstość [14, 17], zmniejszenie deformacji i skurczu przetwórczego wyprasek [7, 15], redukcja lepkości pozornej stopu oraz spadek zużycia materiału wejściowego w postaci granulatu [13]. Dodatkowo zastosowanie wtryskiwania porującego wpływa na zmniejszenie energochłonności [5] oraz skrócenie czasu trwania cyklu procesu wytwarzania. Wynika to z faktu, iż ciśnienie rozprężającego się gazu w gnieździe formy przejmuje rolę fazy docisku w cyklu wtryskowym [8]. Porowanie materiałów polimerowych może jednak powodować obniżenie właściwości mechanicznych, np. wytrzymałości na rozciąganie [1, 7, 9], wytrzymałości na zgięcie [7, 14], modułu sprężystości [9], a także udarności [1, 7, 14]. Co więcej w przypadku procesu porowania fizycznego istotną przeszkodą w realizacji tego procesu jest wysoki koszt instalacji gazowej [11].

Materiały konstrukcyjne o strukturze komórkowej (porowatej) znalazły zastosowanie w branży motoryzacyjnej, lotniczej, biomedycznej oraz w budownictwie [4, 5, 18]. Najczęściej wykorzystywanymi materiałami konstrukcyjnymi są poliamid 6 (PA6) oraz poliamid 66 (PA66) z dodatkiem włókien szklanych. Materiały te – pomimo komórkowej struktury uzyskanej w wyniku procesu porowania – charakteryzują się korzystnymi właściwościami mechanicznymi. Stwierdzono bowiem, że krótkie włókna szklane są dodatkowym obszarem nukleacji i rozrostu porów gazowych [14].

Wielkość oraz liczba porów wpływają bezpośrednio na właściwości finalnego wyrobu [2]. Struktura o drobnych i równomiernie rozmieszczonych porach charakteryzuje się najlepszymi właściwościami mechanicznymi i stabilnością wymiarową. Proces wytwarzania elementów zawierających duże i liczne pory jest korzystny wówczas, gdy główne cele zastosowania poroforu to redukcja masy wypraski lub dobra izolacja cieplna i akustyczna [11].

W procesie porowania chemicznego struktura mikrokomórkowa powstaje w wyniku termicznego rozkładu środka porującego lub jego reakcji z uplastycznionym polimerem. Procesowi temu towarzyszy zjawisko wytworzenia gazu w postaci azotu lub dwutlenku węgla, których cząsteczki zostają zamknięte w strukturze materiału w po-

staci porów gazowych [6, 11, 12]. Efekty procesu porowania chemicznego uzależnione są od stopnia homogenizacji poroforu z materiałem bazowym oraz od temperatury jego rozkładu [18]. Porofory chemiczne wykorzystywane w procesie wtryskiwania dobiera się w zależności od rodzaju przetwarzanego tworzywa sztucznego (temperatura topnienia), ilości gazu powstającego w wyniku rozkładu czy typu reakcji przebiegającej podczas procesu. Cena poroforu, bezpieczeństwo jego stosowania oraz dostępność na rynku to kolejne aspekty, które uwzględniane są podczas wyboru środka porującego [11]. Wyróżnia się porofory endotermiczne i egzotermiczne. Porofory endotermiczne są to związki nieorganiczne, które w wyniku rozkładu wytwarzają dwutlenek węgla. Porofory egzotermiczne to natomiast substancje pochodzenia organicznego, które podczas rozkładu wytwarzają azot [6, 11, 12]. W przetwórstwie tworzyw sztucznych częściej stosuje się porofory endotermiczne ze względu na możliwość uzyskania drobnej struktury mikrokomórkowej oraz lepszych właściwości mechanicznych [11].

W dotychczasowych badaniach Palutkiewicz z zespołem [10] wykazali, że dodanie poroforu chemicznego o zawartości 1% mas. do poliamidu 6 zawierającego włókno szklane przyczynia się do redukcji masy wyprasek oraz obniżenia ich twardości. Wykazano również, że zawartość poroforu wpływa na obniżenie właściwości wytrzymałościowych wyprasek. W badaniach prowadzonych przez Bociągę z zespołem [3] poddano analizie wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości polipropylenowych wyprasek wtryskowych, zawierających od 0,125 do 0,5% mas. endotermicznego poroforu chemicznego. Wykazano, że wraz ze wzrostem zawartości poroforu oraz temperatury formy udarność wyprasek maleje. W pracy wykazano również, że zawartość poroforu wpływa na obniżenie gęstości wyprasek oraz na zmniejszenie zapadnięć skurczowych na ich powierzchniach. Bieliński [1] w swoich badaniach wykazał, iż udarność wyprasek porowatych zwiększa się wraz ze wzrostem ilości dozowanego poroforu chemicznego. Llewelyn z zespołem [8] zbadali wpływ parametrów procesowych na właściwości mechaniczne wyprasek porowatych. Badania te wykazały, że największy wpływ na właściwości wyprasek ma zastosowana temperatura formy wtryskowej.

Celem badań było eksperymentalne wyznaczenie zależności pomiędzy rodzajem i ilością dozowanego modyfikatora chemicznego a wybranymi właściwościami uzyskanych wyprasek porowatych.

2. Metoda badawcza

2.1. Materiał wykorzystany do badań

Materiałem wykorzystanym do przeprowadzenia eksperymentu był poliamid 6 (PA6) o nazwie handlowej Tarnamid T27GF30 (Azoty Tarnów), zawierający 30% mas. włókien szklanych. Do jego modyfikacji wytypowano dwa rodzaje poroforów, przeznaczonych do stosowania w przypadku tworzyw konstrukcyjnych o wysokiej temperaturze topnienia: Expancel 950 MB 80 (Akzonobel) i PLASTRON NUC C20-N (PLASTRON SARL).

2.2. Wytworzenie próbek badawczych

W celu przeprowadzenia pomiarów masy wyprasek oraz badań wytrzymałościowych niezbędne było wytworzenie odpowiednich próbek badawczych. Za pomocą metody wtryskiwania wykonano uniwersalne kształtki badawcze (rys. 1), zgodne z normą PN-EN ISO 3167:2014. Przekrój poprzeczny wypraski w jej odcinku pomiarowym wynosił 4×10 mm.



Rys. 1. Uniwersalna kształtka badawcza zgodna z normą PN-EN ISO 3167:2014
(opracowanie własne)

Fig. 1. Universal test sample in accordance with the PN-EN ISO 3167:2014 standard (own study)

Proces wtryskiwania zrealizowano z użyciem wtryskarki Engel e-victory 110 (Schwertberg, Austria). Uniwersalne kształtki badawcze wytworzono w cztero-ogniowej formie laboratoryjnej. Badania realizowano przy stałych parametrach procesowych, zestawionych w tabeli 1. Wyjątkiem była seria przygotowana bez użycia modyfikatora. W tym przypadku zrealizowano fazę docisku, przy czym ciśnienie wynosiło 40 MPa, a czas 10 s. Parametry dobrano w taki sposób, aby uzyskane wypraski były wolne od zapadnięć powierzchniowych oraz innych wad, charakterystycznych dla wtryskiwania elementów o znaczącej grubości.

Tabela 1. Parametry procesu wtryskiwania (opracowanie własne)

Table 1. Parameters of the injection process (own study)

Parametr	Wartość
Objętość wtrysku [cm ³]	67
Temperatury stref grzewczych[°C]	240(dysza), 240, 220, 200
Temperatura formy [°C]	100
Prędkość wtrysku [cm ³ ·s ⁻¹]	80
Ciśnienie docisku	–
Czas docisku	–
Czas chłodzenia [s]	30
Prędkość ślimaka [m·s ⁻¹]	0,3

Zmiennymi czynnikami w założonym programie badań były rodzaj oraz ilość dozowanego środka porującego. Zastosowano dwa różne środki porujące, o odmiennych mechanizmach działania. Szczegółowy program badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Program przeprowadzonych badań (opracowanie własne)
Table 2. Research program (own study)

Oznaczenie serii	Modyfikator	Ilość modyfikatora (% mas.)
A	–	–
B	Expancel 950 MB 80	0,5
C	Expancel 950 MB 80	3
D	Expancel 950 MB 80	6
E	PLASTRON NUC C20-N	0,5
F	PLASTRON NUC C20-N	2

Aby otrzymać kształtki odpowiednie do badania udarności, niezbędna była obróbka mechaniczna uniwersalnych kształtek badawczych w celu uzyskania belki o wymiarach 80 x 10 x 4 mm (rys. 2).

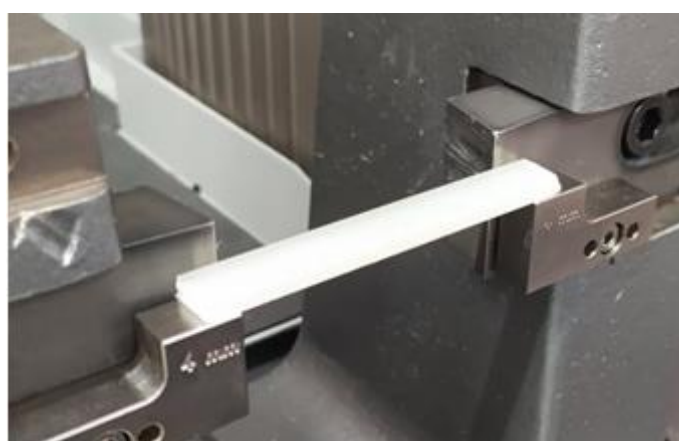


Rys. 2. Próbką przeznaczona do badań udarności (opracowanie własne)
Fig. 2. Impact test sample (own study)

2.3. Metody badawcze

Pierwszym etapem było wyznaczenie masy pojedynczych wyprasek. Do tego celu wykorzystano wagę laboratoryjną Sartorius CPA225D-0CE (Kostrzyn, Polska) o dokładności równej 0,01 mg. Masę wyprasek wyznaczono na podstawie 10 prób z każdej serii. Uzyskane wyniki uśredniono.

Przygotowane próbki poddawane były próbie udarności za pomocą metody Charpy'ego, zgodnie z normą PN-EN ISO 179-1:2010. Urządzeniem badawczym wykorzystanym do przeprowadzenia pomiarów był młot udarowy Zwick/Roell HIT50P (Ulm, Niemcy) (rys. 3).



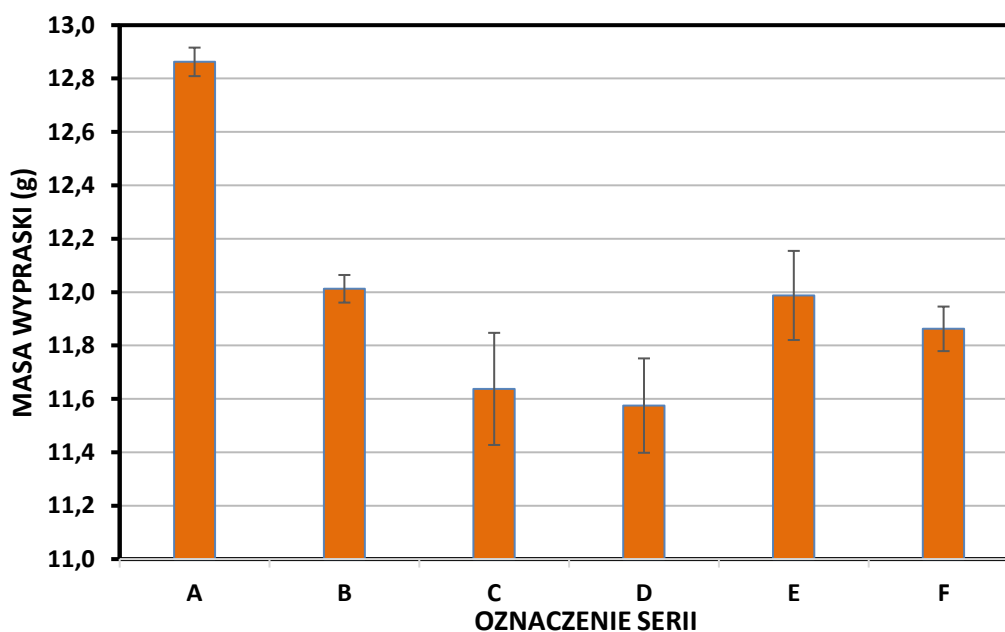
Rys. 3. Przykładowa próbka umieszczona na podporach młota udarowego (opracowanie własne)
Fig. 3. An example sample placed on the sample holders of an impact tester (own study)

Do badania wykorzystano wahadło o energii uderzenia równej 15 J. Próbki badawcze nie miały naciętych korbów. Wykonano 10 powtórzeń, na podstawie których obliczono wartość średnią.

Statyczna próba rozciągania została przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN ISO 179-2:2021. Do wykonania badania użyto maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z020 (Ulm, Niemcy). Próbki rozciągano ze stałą prędkością wynoszącą $1 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ do momentu wyznaczenia modułu sprężystości oraz $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ – w dalszej części badania. Odległość między uchwytami mocującymi wynosiła 116 mm. Pomiarów modułu sprężystości wzdłużnej dokonano za pomocą ekstensometru mechanicznego dla odcinka pomiarowego o długości 50 mm. Badaniom poddano 10 wyprasek z każdej serii pomiarowej, a uzyskane wyniki uśredniono.

3. Wyniki

Stwierdzono, że w wyniku zastosowania porofoarów nastąpiła znacząca redukcja masy wyprasek wtryskowych, a intensywność zmian była uzależniona od rodzaju i zawartości środka porującego (rys. 4).



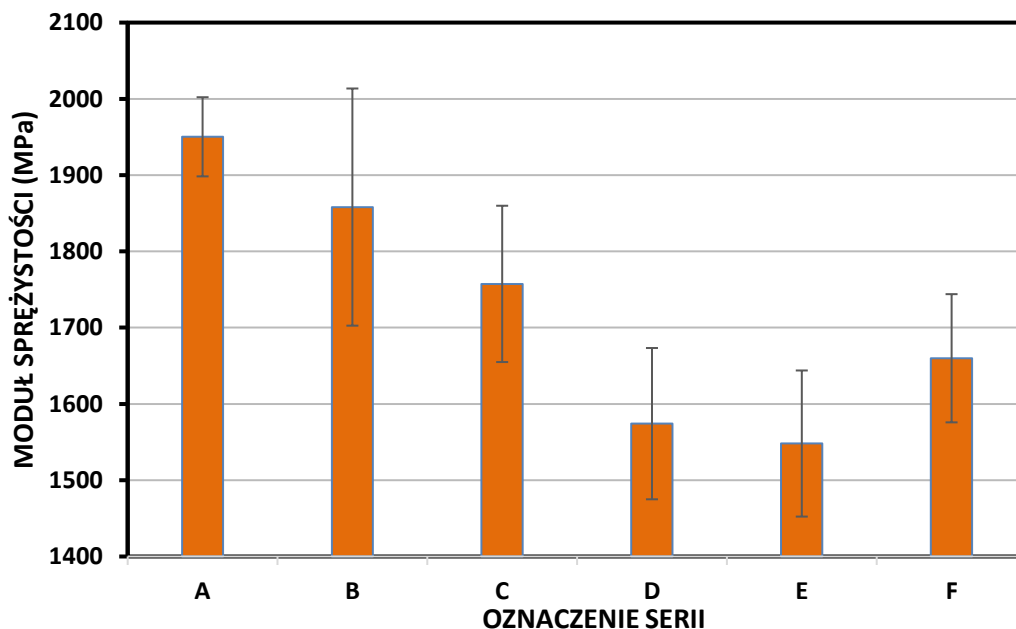
Rys. 4. Wpływ rodzaju i zawartości porofoaru na zmianę masy wyprasek z PA6 GF30 (opracowanie własne)

Fig. 4. Influence of the type and content of the blowing agent on the weight change of PA6 GF30 moldings (own study)

Najniższe wartości masy zanotowano dla serii D oraz C, dla których zastosowano środek Expancel 950 MB 80 w stężeniach równych odpowiednio 3% oraz 6%. Wartości te wynosiły odpowiednio 11,58 g oraz 11,64 g. Odpowiada to redukcji masy na poziomie około 10%. Serie B oraz E, wykonane z użyciem dwóch porofoarów o identycznym stężeniu 0,5% mas., spowodowały bardzo podobny efekt. Zwiększanie ilości środka porującego skutkowało większą redukcją masy

w przypadku środka Expancel 950 MB 80 (próbki C oraz D) niż w przypadku wyprasek modyfikowanych poroforem PLASTRON NUC C20-N (próbki F). Należy również zauważyć, że w przypadku wyprasek typu B współczynnik zmienności masy był najmniejszy wśród analizowanych próbek porowatych.

Na rysunku 5 przedstawiono zmiany modułu sprężystości wzdłużnej w zależności od rodzaju i zawartości porofoforów. Dla wszystkich wyprasek porowatych wartość tego parametru była niższa od tej, zanotowanej dla próbek litych (1950 MPa). Próbki B charakteryzują się najlepszym modułem sprężystości wzdłużnej spośród analizowanych wyprasek porowatych, który wyniósł 1858 MPa. Zaobserwowano także, że w przypadku dozowania środka PLASTRON NUC tendencja ta została odwrócona. Jednak wydaje się, że niełatwo scharakteryzować strukturę porowatą, biorąc pod uwagę wartości odchylenia standardowego, ponieważ utrudnia to duży rozrzut wyników.

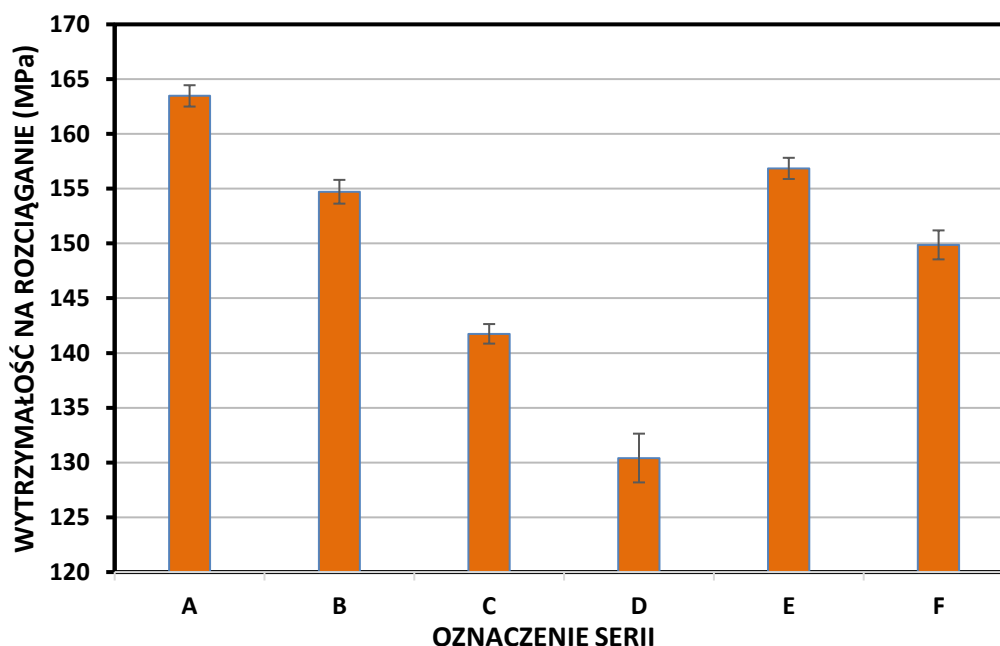


Rys. 5. Wpływ rodzaju i zawartości porofoforu na moduł sprężystości wzdłużnej wyprasek z PA6 GF30 (opracowanie własne)

Fig. 5. Influence of the type and content of blowing agent on the modulus of elasticity of PA6 GF30 moldings (own study)

Znacznie korzystniej pod względem powtarzalności zrealizowanych serii przedstawia się wykres zmian wytrzymałości na rozciąganie próbek porowatych, wytworzonych z różną zawartością porofoforów (rys. 6). Co prawda obserwuje się nieznaczny spadek wytrzymałości tych próbek w stosunku do wypraski litej z PA6 GF30, ale wartości R_m uzyskane dla serii B, E oraz F klasyfikują je jako bardzo dobre materiały konstrukcyjne o obniżonej masie. Zauważono, że wraz ze zwiększeniem ilości środków porotwórczych wytrzymałość badanych wyprasek maleje. Najniższą wartość wytrzymałości na rozciąganie uzyskał kompozyt o zawartości 6% porofoforu Expancel 950 MB 80 (seria D). Pomimo że dla serii C i D uzyskano

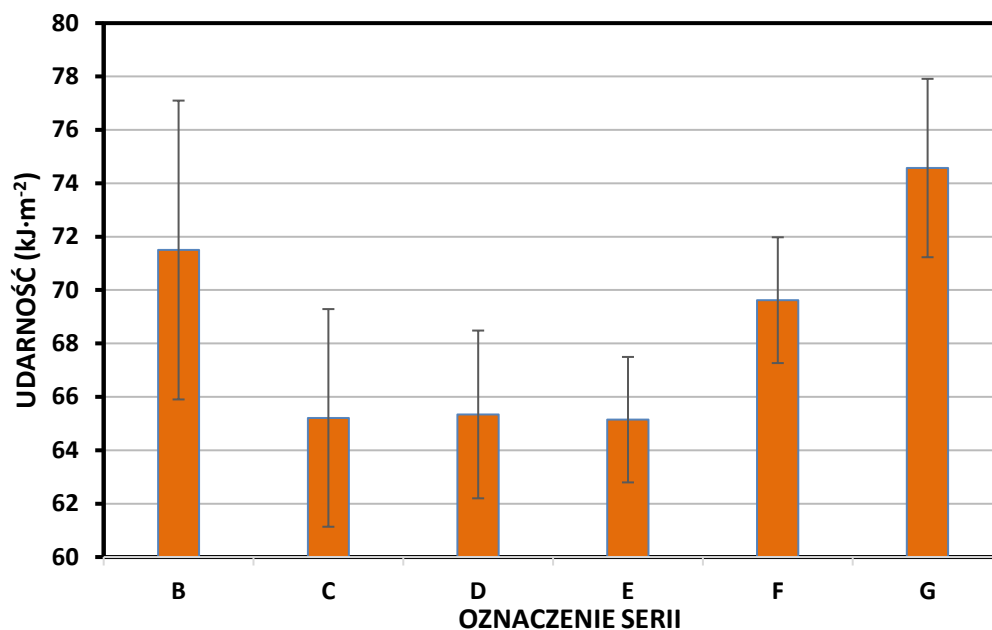
redukcję masy na zbliżonym poziomie, to jednak próbki C mają lepszą wytrzymałość na rozciąganie (141,8 MPa). Warto także dodać, że wypraski D, charakteryzujące się wartością 130,4 MPa, także można uznać jako dobre, polimerowe materiały konstrukcyjne, ponieważ przeciętna wartość R_m dla wyprasek nienapełnionych włóknami, a spełniających znamiona tworzyw konstrukcyjnych jest dwa razy mniejsza. Oznacza to, że uzyskana struktura porowata nie obniżyła w sposób znaczący wytrzymałości na rozciąganie. Pory znajdujące się w strukturze materiału nie osłabiły jej jako nadmiernie działające karby.



Rys. 6. Wpływ rodzaju i zawartości poroforu na wytrzymałość na rozciąganie wyprasek z PA6 GF30 (opracowanie własne)

Fig. 6. Influence of the type and content of the blowing agent on the tensile strength of PA6 GF30 moldings (own study)

Wyniki średniej udarności wyprasek spienionych chemicznie przedstawiono na rysunku 7. Próbkami B, C oraz D charakteryzują się niższą udarnością w porównaniu z próbkami litymi. Tymczasem serie E oraz F uzyskały zbliżone bądź większe wartości udarności w odniesieniu do litych PA6 GF30. Analizując wyniki udarności, nie zaobserwowano jej zmian w przypadku dozowania do polimeru poroforu Expancel 950 MB 80, niezależnie od jego zawartości w osnowie. W przypadku zwiększenia ilości środka porotwórczego PLASTRON NUC C20-N z wartości 0,5% (seria E) do 2% (seria F) uzyskano wyższą wartość udarności (74,57 kJ·m⁻²). Zaobserwowany efekt wzrostu podatności na udarowe obciążenia w funkcji dozowania poroforu jest zgodny z wcześniejszymi doniesieniami naukowymi [1]. Ponadto w przypadku wyprasek oznaczonych jako F zauważono o ponad 4% większą wartość średniej udarności niż w przypadku materiału litego. Zjawisko to pokrywa się z zależnościami przedstawionymi w literaturze, w której również zanotowano wzrost udarności na skutek spieniania tworzyw sztucznych [15].



Rys. 7. Wpływ rodzaju i zawartości poroforu na udarność kompozytów z PA6 GF30 (opracowanie własne)

Fig. 7. Influence of the type and content of the blowing agent on the impact strength of PA6 GF30 composites (own study)

4. Wnioski

Stwierdzono istotny wpływ rodzaju oraz ilości środka porującego na właściwości wyprasek z PA6 GF30. Zwiększenie zawartości obu rodzajów poroforów chemicznych w poliamidowej osnowie powoduje znaczącą redukcję masy wyprasek, co można uznać za zjawisko korzystne. W przypadku zastosowania środka Expancel 950 MB 80 uzyskano największą redukcję masy na poziomie 10% (stężenie 3% i 6%). Dodatkowo zastosowanie środka porującego powoduje obniżenie modułu sprężystości wzdłużnej w porównaniu z materiałem litym. Zanotowano jednak, że wzrost stężenia dozowanego środka PLASTRON NUC C20-N powoduje odmienną sytuację. Przeprowadzone badania wykazały również, że dodanie poroforu chemicznego obniża wytrzymałość na rozciąganie wyprasek. Wytrzymałość ulega zmniejszeniu wraz ze zwiększeniem ilości środka porotwórczego w kompozycie PA6 GF30. Zwiększenie ilości poroforu Expancel 950 MB 80 z wartości 3% do 6% (seria C i D) nie powoduje większej redukcji masy wypraski, natomiast przyczynia się do znacznego obniżenia wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości oraz udarności. Z tego względu nie jest zasadne dozowanie tego środka porotwórczego w stężeniu 6%. Tymczasem użycie poroforu PLASTRON NUC C20-N poprawia podatność materiału na obciążenia udarowe, także w stosunku do próbek litych PA6 GF30. Świadczy to o zdolności struktury porowatej do pochłaniania energii uderzenia wahadła w przypadku odpowiedniego doboru rodzaju i ilości poroforów w stosunku do modyfikowanego tworzywa polimerowego. Można zauważyć także, że próbki C charakteryzują się wysoką redukcją masy przy zadowalających właściwościach mechanicznych, natomiast wypraski F mają najlep-

szą udarność przy stosunkowo małej zmianie masy. Można zatem stwierdzić, iż korzystne jest użycie poroforu Expancel 950 MB 80, gdy trzeba znacznie zredukować masę wytworu. Tymczasem lepsze efekty w zakresie utrzymania, a nawet poprawy (udarność) właściwości mechanicznych wyprasek z PA6 GF30 można uzyskać, gdy zastosuje się porofor PLASTRON NUC C20-N.

Bibliografia

- [1] Bieliński, M., „Techniki porowania tworzyw termoplastycznych”, Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 2004.
- [2] Bociąga, E., Palutkiewicz, P., „Wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości i stan powierzchni wyprasek z polipropylenu”, *Polimery* 56(10), (2011).
- [3] Bociąga, E., Palutkiewicz, P., „Wpływ zawartości poroforu i warunków wtryskiwania na wybrane właściwości i stan powierzchni wyprasek z polipropylenu”, *Polimery* 57(1), (2012).
- [4] Brdlík, P., Sailor, N., Bobek, J., „Computer analysis of polyolefins produced with injection molding process using physical blowing agents”, *Mater. Sci. Forum* 919, (2018), 299–306, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.919.299>.
- [5] Chung, C.Y., Hwang, S.S., Chen, S.C., Lai, M.C., „Effects of injection molding process parameters on the chemical foaming behavior of polypropylene and polystyrene”, *Polymers* 13(14), (2021), doi: <https://doi.org/10.3390/polym13142331>.
- [6] Heck, R.L., III, Peascoe, W.J., „Blowing Agents”, in „Encyclopedia of Polymer Science and Technology”, John Wiley & Sons, Hoboken 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst032>.
- [7] Kim, H.K., Sohn, J.S., Ryu, Y., Kim, S.W., Cha, S.W., „Warp Reduction of Glass Fiber Reinforced Plastic Using Microcellular Foaming Process Applied Injection Molding”, *Polymers* 11(2), (2019), 360, doi: <https://doi.org/10.3390/polym11020360>.
- [8] Llewelyn, G., Reess, A., Griffiths, C., Jacobi, M., „A Design of Experiment Approach for Surface Roughness Comparisons of Foam”, *Materials* 13(10), (2020), 2358, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13102358>.
- [9] Nobe, R., Qiu, J., Kudo, M., Ito, K., Kaneko, M., „Effects of SCF Content, Injection Speed and CF Content on the Morphology and Tensile Properties of Microcellular Injection-Molded CF/PP Composites”, *Polym. Eng. Sci.* 59(7), (2019), 1371–1380, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.25120>.
- [10] Palutkiewicz, P., Bold, M., „Wpływ dodatku środka porującego i napelnacza na wybrane właściwości wyprasek wtryskowych z poliamidu 6 i polipropylenu”, *Przemysł Chemiczny* 1, (2020), 147–150, doi: 10.15199/62.2020.1.22.
- [11] Palutkiewicz, P., Garbacz, T., „Ocena efektywności wybranych środków porujących w procesie wtryskiwania wyprasek z tworzyw termoplastycznych”, *Polimery/Polymers* 62(6), (2017), 447–456, doi: <https://doi.org/10.14314/polimery.2017.447>.
- [12] Ruiz, R., Vincent, J.A., Agassant, M., Sadik, J.F., Pillon, T.C., Carrot, C., „Polymer foaming with chemical blowing agents: Experiment and modeling”, *Polym. Eng. Sci.* 55(9), (2015), 2018–2029, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.24044>.
- [13] Sykutera, D., Czyżewski, P., Szewczykowski, P., „The Microcellular Structure of Injection Molded Thick-Walled Parts as Observed by In-Line Monitoring”, *Materials* 13(23), (2020), 5464, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13235464>.
- [14] Sykutera, D., Czyżewski, P., Szewczykowski, P., „High-performance of a thick-walled polyamide composite produced by microcellular injection molding”, *Materials* 14(15), (2021), doi: <https://doi.org/10.3390/ma14154199>.
- [15] Sykutera, D., Szewczykowski, P., Roch, M., Wajer, Ł., Grabowski, M., Bieliński, M., „Effect of nitrogen content on physical properties of glassfiber reinforced polyamide 6 prepared by microcellular injection molding”, *Polimery* 63(11–12), (2018), 743–749, doi: <https://doi.org/10.14314/polimery.2018.11.1>.
- [16] „Tworzywa – Fakty 2020. Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie”, https://plasticseurope.org/pl/wp-content/uploads/sites/7/2021/11/Tworzywa-Fakty-2020_PL_do-pobrania.pdf, (dostęp: 21.11.21).

- [17] Volpe, Va., Pantani, R., "Effect of processing condition on properties of polylactic acid parts obtained by foam injection molding", *J. Cell. Plast.* 53(5), (2016), doi:10.1177/0021955X16670589.
- [18] Weber, H., De Grave, I., Röhr, E., Altstädt, V., "Foamed Plastics" in "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH, Weinheim 2016, 1-54, doi: https://doi.org/10.1002/14356007.a11_435.pub2.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).