

Agnieszka WAŁĘKA, Jowita SZYMAŃSKA, Anita BIAŁKOWSKA, Marcin KOSTRZEWA,  
Mohamed BAKAR

Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu,  
WMTiW, Katedra Technologii Materiałów Organicznych,  
ul. Chrobrego 27, 26-600 Radom

## Badanie właściwości nanokompozytów żywicy epoksydowej zmodyfikowanej polimetakrylanem metylu

**Streszczenie:** Praca zawiera wyniki badań nad modyfikacją żywicy epoksydowej EPIDIAN 5 przez zastosowanie dodatku poli(metakrylanu metylu) (PMMA) oraz Nanobentów ZS1 i ZR2. Poli(metakrylan metylu) był dodawany w ilości 5, 10, 15% wag., Nanobenty w ilości 1, 2% wag. ZR2 i 1, 2, 3, 4% wag. ZS1. Otrzymano różniące się zawartością modyfikatorów kompozycje konwencjonalne i hybrydowe, dla których oznaczono właściwości wytrzymałościowe takie jak: uderność, krytyczny współczynnik intensywności naprężeń ( $K_c$ ), odporność na trójpunktowe zginanie. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dodatek poli(metakrylanu metylu) poprawia badane właściwości mechaniczne żywicy Epidian 5, a najlepsze wyniki posiadają kompozycje zawierające 5% zawartości ciekłego modyfikatora polimerycznego. Polepszenie właściwości wytrzymałościowych żywicy epoksydowej zaobserwowano również dla kompozycji zawierających 1% ZS1 i 1% ZR2. W przypadku kompozycji hybrydowych, najlepsze właściwości w porównaniu z żywicą niemodyfikowaną zanotowano dla układów 1% ZS1 i 5% PMMA i 2% ZS1 i 5% PMMA.

**Kluczowe słowa:** żywica epoksydowa, nanokompozyty, właściwości mechaniczne

### SUTVEY PROPERTIES NANOCOMPOSITE EPOXY RESIN MODIFIED POLYMETHYL METHACRYLATE

**Summary:** The present work investigates the modification of epoxy resin EPIDIAN 5 by using poly (methyl methacrylate) (PMMA) and Nanobent ZS1 and ZR2. Poly (methyl methacrylate) was added in an amount of 5, 10, 15% and Nanobents 1, 2% , ZR2 and 1, 2, 3, 4% ZS1. Impact strength, critical stress intensity factor ( $K_c$  flexural strength and flexural strain under three-point were evaluated for obtained conventional and hybrid composites Based on the obtained results, it was found that the addition of poly (methyl methacrylate) improves the mechanical properties of the epoxy resin Epidian 5, and the best results were obtained by the composites containing 5% of liquid polymeric modifier. The improvement of the epoxy resin strength was also observed for the composite containing 1% ZS1 and 1% ZR2. In the case of hybrid composites, the best properties in comparison with unmodified epoxy resin were shown by composites based on 1% ZS1 and 5% PMMA as well as 2% ZS1 and 5% PMMA.

**Keywords:** epoxy resin, nanocomposites, mechanical properties

### 1. WSTĘP

Żywice epoksydowe, jako produkt przemysłowy, stosowane są od ponad pół wieku. Pierwszą żywicę epoksydową otrzymano w 1936 r. w firmie Troy w Szwajcarii a wykorzystano ją do celów dentystycznych. Niemodyfikowane żywice epoksydowe posiadają wiele korzystnych właściwości użytkowych takich jak: dużą wytrzymałość mechaniczną,

dużą twardość, odporność chemiczną, odporność na działanie czynników atmosferycznych, odporność na korozję, dobre właściwości adhezyjne (dobra przyczepność do innych materiałów, m.in.: do polarnych tworzyw sztucznych, szkła, ceramiki, betonu), wysoką odporność na procesy starzenia, dobre właściwości dielektryczne. Wszystko to sprawia, że tworzywa te wykorzystywane są w wielu gałęziach przemysłu, wśród których wymienić należy przemysł

elektrotechniczny, elektroniczny, maszynowy, lotniczy, czy choćby budowniczy, gdzie omawiane żywice mogą być stosowane jako kleje, lakiery, żywice lane, tłoczywa epoksydowe, piankowe itp. [1,2]. Ze względu na łatwość produkcji i modyfikacji żywice epoksydowe mogą być szeroko stosowane w przemyśle. Ich wykorzystanie rośnie z każdym rokiem. Już 10 lat temu oszacowano, że zapotrzebowanie rynku światowego wyniesie ok. 1,55 mln ton [3].

Mimo swoich licznych zalet, tj. dużej odporności chemicznej, dobrych właściwości elektroizolacyjnych, żywice epoksydowe posiadają również wady, są kruche, mało odporne na propagację pęknięcia. W celu poprawy właściwości prowadzi się badania nad ich modyfikacją. Poprzez zastosowanie szerokiej gamy dodatków można osiągnąć pożądane właściwości mechaniczne i obniżyć koszt produkcji tworzywa.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań kompozycji hybrydowych otrzymanych na bazie żywicy epoksydowej zawierających krajowy montmorylonit i poli(metakrylanu metylu) (PMMA).

Zainteresowanie technologią modyfikacji polimerów za pomocą nanonapełniaczy jest stosunkowo nowe. Rozwinęło się ono w latach dziewięćdziesiątych. Zastosowanie nanonapełniacza umożliwia osiągnięcie dużo lepszych właściwości fizycznych i mechanicznych matrycy polimerowej. Kompozyty polimerowe z napełniaczami o cząstkach nanometrycznych charakteryzują się większą stabilnością termiczną, wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie, mniejszą przepuszczalnością gazów oraz dobrymi właściwościami ślizgowymi pozwalającymi na zastosowanie ich jako elementy bezsmarowe w częściach maszyn [4]. Do wytwarzania nanokompozytów polimerowych stosowane są głównie glinokrzemiany warstwowe oraz dwuwarstwowe hydroksytlenki metali. Największy jednak udział, bo około 70% mają nanoglinki (glinokrzemiany warstwowe). Spośród nich najbardziej rozpowszechniony jest montmorylonit, następnie hektoryt, bentonit i saponit. Jednym z glinokrzemianów używanych do modyfikacji

polimerów jest montmorylonit modyfikowany monofosforanem N-[tris(hydroksymetyloaminometano),2-hydroksy-3-oksykrezylopropylo,2-hydroksy-3-oksyalkilo(C<sub>12</sub>/C<sub>13</sub>) amoniowym (ZS1). Został on użyty w powyższej pracy jako modyfikator żywicy epoksydowej Epidian 5.

Polimetakrylan metylu (PMMA) jest tworzywem należącym do grupy tworzyw termoplastycznych. Tworzywa te charakteryzują się tym, że w odpowiedniej temperaturze zachowują się jak lepka ciecz – co umożliwia ich kształtowanie z wykorzystaniem wtryskiwania. Po gwałtownym schłodzeniu kształt utrwała się, nabierając cech ciała stałego. Poli(metakrylan metylu) jest odporny na działanie czynników atmosferycznych, kwasów, zasad, ozonu, węglowodorów alifatycznych oraz niskich temperatur. Ulega natomiast działaniu węglowodorów aromatycznych, ketonów, estrów. Jest palny, nie jest odporny na wysokie temperatury. Polimetakrylan metylu przepuszcza promieniowanie widzialne w ponad 90%. O zastosowaniu poli(metakrylanu metylu) decydują jego najważniejsze właściwości tzn. przezroczystość, odporność na czynniki atmosferyczne, łatwość obróbki mechanicznej i możliwość wielokrotnego polerowania. Z polimetakrylanu metylu (produkowanego w postaci arkuszy, prętów, bloków i rur) wykonywane są klosze świateł sygnalizacyjnych, soczewki, szyby okienne, lotnicze i samochodowe, urządzenia sanitarne, naczynia stołowe, lakiery, sztuczna biżuteria i innych wyroby codziennego użytku [5,6].

## 2. CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

### 2.1. SUROWCE

Do przygotowania kompozytów zastosowano: małowcząsteczkową żywicę epoksydową Epidian 5, utwardzacz: trietylenotetraamina (Z1), nanonapełniacz: Nanobent ZR2 nanonapełniacz: Nanobent ZS1, poli(metakrylan metylu) (ogólny gatunek), rozpuszczalnik stosowany do przygotowania dyspersji z nanonapełniaczem i rozpuszczenia poli(metakrylanu metylu), dichlorometan.

## 2.2. PRZYGOTOWANIE KOMPOZYTU

W celu przygotowania tzw. kompozycji zerowej (bez udziału modyfikatora), do zlewki o pojemności 250 cm<sup>3</sup> wprowadzono 100g żywicy. Dla zachowania jednolitych warunków otrzymywania wszystkich kompozycji, żywicę poddano mieszaniu na mieszadle ultradźwiękowym (40 minut, cykl =1, amplituda= 100%). Na koniec zawartość zlewki wprowadzono do oczyszczonej, pokrytej środkiem antyadhezyjnym formy na 10 gniazd. Tak przygotowane próbki pozostawiono do utwardzenia na 24h w temp. pokojowej, po czym poddano dotwardzaniu w suszarce w temp. 120°C w czasie 3h.

### 2.2.1. SPORZĄDZENIE DYSPEKSI

Aby przygotować 15% zawiesinę nanonapełniacza (Nanobent ZS1 i ZR2) do zlewki wprowadzono 15g zmodyfikowanego montmorylonitu i 85g dichlorometanu (22,7cm<sup>3</sup>) (rozpuszczalnik organiczny). Zawartość wymieszano za pomocą homogenizatora ultradźwiękowego (20 minut, cykl =1, amplituda= 80%).

### 2.2.2. SPORZĄDZENIE KOMPOZYCJI ZAWIERAJĄCEJ NANOBENTY ZS1 I ZR2

Do badań użyto próbek zawierających różne ilości nanonapełniacza (1, 2, 3, 4% wag. ZS1 i 1, 2% wag. ZR2). Do zlewki odważono odpowiednią ilość żywicy epoksydowej i Nanobentu. Mieszaninę wymieszano za pomocą homogenizatora ultradźwiękowego Hielscher UP 2004 (40 min, cykl =1, amplituda= 100%).

Otrzymaną mieszaninę odpowietrzono za pomocą mieszadła ultradźwiękowego Hielscher UP 2004 (cykl =1, amplituda= 100%) do momentu odparowania dichlorometanu użytego do sporządzenia dyspersji ZMMT. Po odpowietrzeniu żywicę schłodzono w temperaturze pokojowej. Do zlewki z żywicą naważono stechiometryczne ilości utwardzacza. Kompozycję wymieszano ręcznie. Na odpowiednio oczyszczone pokryte środkiem antyadhezyjnym formy wylano sporządzone kompozycje. Tak przygotowane próbki pozostawiono na 24h do utwardzania w temperaturze pokojowej, następnie dotwardzono je w temperaturze 80°C przez 3 godziny.

Tabela 1. Skład otrzymanych kompozycji z Nanobentem ZS1/ZR2

Table 1. Prepared compositions containing Nanobent ZS1/ZR2

Nanobent ZS1/ZR2 (g)	Rozpuszczalnik (g)	Żywica (g)	Utwardzacz (g)
1	5,7	88,4	10,6
2	11,3	87,5	10,5
3	17,0	86,6	10,4
4	22,7	85,7	10,3

### 2.2.3. SPORZĄDZENIE KOMPOZYCJI ZAWIERAJĄCEJ POLI(METAKRYLAN METYLU)

Przed przystąpieniem do wykonania kompozycji zawierającej poli(metakrylan metylu) przygotowano 25% roztwór PMMA w dichlorometanie. Następnie wykonano kompozycje z 5, 10, 15% wag. poli(metakrylanu metylu) (PMMA). W tym celu do zlewki wprowadzo-

no odpowiednią ilość żywicy i PMMA. Całość mieszano za pomocą: mieszadła ultradźwiękowego (40 minut, cykl= 1, amplituda= 100%). Następnie mieszaninę odpowietrzono za pomocą mieszadła ultradźwiękowego Hielscher UP 2004 (cykl =1, amplituda= 100%) do momentu odparowania dichlorometanu. Kolejno naważono stechiometryczną ilość utwardzacza (12g na 100g żywicy) i postępowano jak poprzednio.

**Tabela 2. Skład otrzymanych kompozycji z PMMA**  
**Table 2. Obtained compositions containing PMMA**

PMMA (%)	masa żywicy (g)	masa utwardzacza (g)
5	84,8	10,2
10	80,3	9,7
15	75,9	9,1

#### 2.2.4. SPORZĄDZENIE KOMPOZYCJI HYBRYDOWEJ

Sporządzono następujące kompozycje hybrydowe:

- 1% ZS1 i 5, 10, 15% kauczuku reaktywnego,
- 2% ZS1 i 5, 10, 15% kauczuku reaktywnego.

Do zlewki wprowadzono odpowiednie ilości żywicy i poli(metakrylanu metylu). Całość poddano mieszanemu na mieszadle ultradźwiękowym (40minut, cykl= 1, amplituda= 100%). Kolejno dodano stechiometryczną ilość Nanobentu.

Wszystko wymieszano jak wyżej. Kompozycję hybrydową odpowietrzono za pomocą mieszadła ultradźwiękowego (cykl =1, amplituda= 100%) do momentu odparowania dichlorometanu użytego do sporządzenia dyspersji nanonapełniacza i roztworu PMMA. Mieszaninę ostudzono do temp. pokojowej i dodano potrzebną ilość utwardzacza. Wszystko poddano homogenizacji za pomocą szklanej bagietki i wylano do formy. Próbkę pozostawiono na 24h do utwardzania w temperaturze pokojowej, następnie dotwardzono je w temperaturze 80°C przez 3 godziny.

**Tabela 3. Skład otrzymanych kompozycji hybrydowych**  
**Table 3. Prepared hybrid compositions**

Nanobent ZS1/ZR2 (%)	masa rozpuszczalnika (g)	PMMA (%)	masa żywicy (g)	masa utwardzacza (g)
1	5,7	5	84,0	10,0
		10	79,5	9,5
		15	75,0	9,0
2	11,3	5	83,0	10,0
		10	78,5	9,5
		15	74,0	9,0

### 3. REZULTATY I DYSKUSJA WYNIKÓW

Utwardzone kompozycje poddano badaniom wytrzymałościowym takim jak odporność na pęknięcie (udarność metodą Charpy'ego z karbem 1 mm, wg. ISO 179, i propagację pęknięcia (współczynnik krytycznej intensywności naprężeń –  $K_{IC}$  – próbki z karbem 1mm) jak również odporności na zginanie trójpunktowe (wg. ISO 178, aparat Zwick/Roell). Wszystkie badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej, stosując rozstaw podpór 60 mm na próbkach

prostopadłościennych o wymiarach 80x10x4mm przy prędkości deformacji 5mm/min. Wyniki z przeprowadzonych badań zobrazowano poniżej za pomocą tabel i wykresów.

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 4 stwierdzono, że dodatek modyfikatora polimerycznego kompozycji PMMA poprawił udarność przygotowanych kompozycji w porównaniu z czystą żywicą. Największą udarność otrzymano przy kompozycji zawierającej 5% PMMA. Udarność w tym przypadku wzrosła o blisko 50 % w stosunku do czystej żywicy. Wysoką udarność (wzrost o prawie 40%

**Tabela 4. Właściwości mechaniczne kompozycji żywicy epoksydowej Epidian 5 z modyfikatorami**  
**Table 4. Mechanical properties of epoxy resin composites containing modifiers**

Modyfikator	Ilość modyfikatora (%)	Udarność [kJ/m <sup>2</sup> ]	K <sub>C</sub> [MPam <sup>1/2</sup> ]	Energia kruchego pękania [kJ/m <sup>2</sup> ]
-	0	0,8	1,0	0,4
ZR2	1	1,4	1,6	1,2
	2	1,3	2,0	2,1
ZS1	1	1,1	1,3	0,5
	2	0,9	1,4	0,6
	3	1,1	1,6	1,8
	4	0,3	2,3	2,9
PMMA	5	1,2	1,2	0,8
	10	1,1	0,8	0,5
	15	0,7	0,4	0,3

w stosunku do kompozycji żywicy niezmodyfikowanej) wykazała kompozycja zawierająca 10% PMMA. Dodatek nanonapełniacza ZS1 poprawił udarność przygotowanych kompozycji w porównaniu z czystą żywicą. Maksymalną wartość udarności osiągnięto dla kompozycji zawierającej 4% ZS1. Największą udarność otrzymano przy kompozycji zawierającej 4% ZS1. Wzrost udarności kompozycji wynosił ponad 60 % w stosunku do czystej żywicy.

Nanobent ZS1 wybrano do przygotowania kompozytów hybrydowych żywicy Epidian 5 z modyfikatorem polimerycznym (PMMA).

Wartości odporności kompozycji żywicy epoksydowej na trójpunktowe zginanie przedstawiono w tabeli 5. Wynika stąd, że dodatek modyfikatorów (PMMA lub nanocząstek ZS1 i ZR2 spowodował wzrost wytrzymałości na zginanie trójpunktowe żywicy epoksydowej Epidian 5.

**Tabela 5. Wartości odporności kompozycji żywicy epoksydowej na trójpunktowe zginanie**  
**Table 5. Flexural properties of epoxy resin composites**

Modyfikator	Ilość modyfikatora (%)	Napężenie przy zerwaniu [MPa]	Odształcenie przy zerwaniu [%]	Energia zerwania [kJ/m <sup>2</sup> ]	Moduł zginania [GPa]
-	-	54,0	2	2,9	1,0
ZR2	1	88,3	3,8	11,9	2,7
	2	51,2	2,1	3,8	2,5
ZS1	1	60,1	2,7	5,5	2,4
	2	40,6	1,9	2,6	2,1
	3	38,5	1,9	2,5	2,1
	4	34,2	1,6	2,3	2,0
PMMA	5	42,0	2,3	3,2	2,8
	10	39,8	1,6	3,0	2,4
	15	16,3	0,8	0,5	2,1

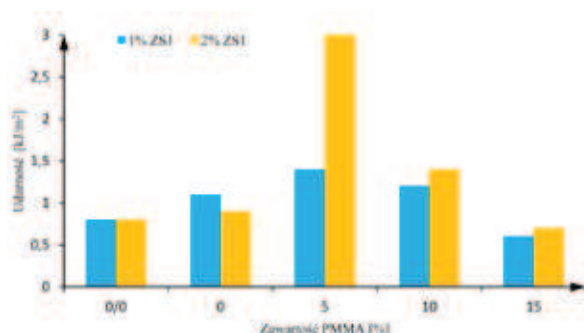
Z wyników przedstawionych w tabeli 5 odnotowano, że dodatek nanonapełniaczy ZS1 i ZR2 spowodował wzrost wartości napężenia przy zerwaniu podczas zginaniu trójpunktowego.

Największą wartość napężenia otrzymano dla kompozytu z 1% zawartością nanobentu ZS1 i ZR2. Wartość napężenia w przypadku nanobentu ZS1 wzrosła o około 10% w stosunku

do próbki z czystą żywicą. W przypadku nanobentu ZR2 odnotowano wzrost wartości natężenia o około 60%. Jak widać z tabeli 5% dodatek modyfikatora PMMA spowodował największy wzrost odkształcenia przy zerwaniu. Odkształcenie przy zniszczeniu wzrosło o 15% w porównaniu do czystej żywicy. 5% dodatek PMMA miał również największy wpływ na moduł przy zginaniu. Wartość modułu wzrosła o około 200% w porównaniu do czystej żywicy.

Na wykresie 1 przedstawiono zależność udarności kompozycji żywicy epoksydowej od zawartości modyfikatora poli(metakrylanu metylu) i nanonapełniacza ZS1. Dodatek PMMA i ZS1 poprawił udarność przygotowanych kompozycji w porównaniu z czystą żywicą.

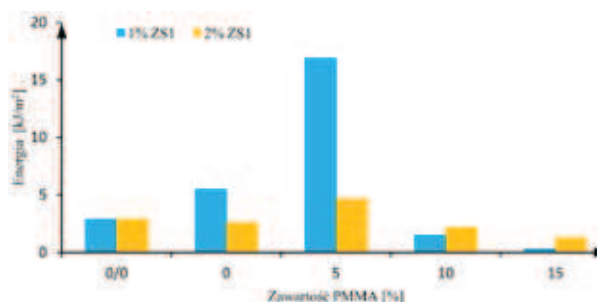
Największą udarność otrzymano dla kompozycji zawierającej 5% PMMA i 2% ZS1. Udarność w tym przypadku wzrosła o około 200% w stosunku do czystej żywicy i żywicy epoksydowej zmodyfikowanej 2% ZS1. W przypadku kompozycji hybrydowej zawierającej 5% PMMA i 2% ZS1 zaobserwowano efekt synergizmu. Faktycznie, udarność kompozycji hybrydowej (3 kJ/m<sup>2</sup>) jest większa o około 40% w stosunku do sumy udarności kompozycji zawierającej kolejno 2% ZS1 (0,9 kJ/m<sup>2</sup> + 1,2 kJ/m<sup>2</sup> = 2,1 kJ/m<sup>2</sup>) i udarności kompozycji z 5% PMMA. Występowanie efektu synergizmu i znaczna poprawa udarności kompozycji hybrydowej może być związana z bardzo dobrą kompatybilnością pomiędzy matrycą polimerową z modyfikatorami (PMMA+ Nanobent ZS1).



Rys 1. Wpływ zawartości PMMA i ZS1 na udarność żywicy epoksydowej

Fig. 1. Effect of PMMA and ZS1 content on impact strength of epoxy resin

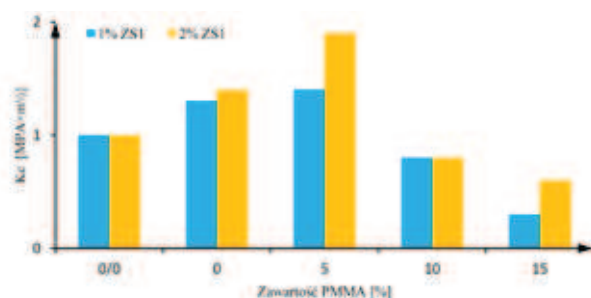
Na wykresie 2 przedstawiono zależność energii przy zginaniu trójpunktowym kompozycji matrycy polimerowej od zawartości modyfikatorów (polimetakrylanu metylu i nanonapełniacza ZS1). Wartości energii zginania obliczono z pola pod krzywą zależności obciążenia-ugięcia). Z wykresu wynika, że największą wartość energii osiągnęła kompozycja zawierająca 1% ZS1 i 5% PMMA. Poprawa wartości wynosiła około 600% w stosunku do odkształcenia niezmodyfikowanej żywicy epoksydowej i o około 300% w stosunku do żywicy epoksydowej zmodyfikowanej 1% ZS1. W przypadku kompozycji hybrydowej zawierającej 5% PMMA i 1% ZS1 zaobserwowano efekt synergizmu. Faktycznie, energia przy zginaniu trójpunktowym kompozycji hybrydowej (16,9 kJ/m<sup>2</sup>) jest większa o około 90% w stosunku do sumy energii przy zginaniu trójpunktowym kompozycji zawierającej kolejno 1% ZS1 i 5% PMMA (5,5 kJ/m<sup>2</sup> + 3,2 kJ/m<sup>2</sup> = 8,7 kJ/m<sup>2</sup>). Znaczna poprawa energii zginania wraz z występowaniem efektu synergizmu mogą być tłumaczone bardzo dużym odkształceniem przy zerwaniu kompozycji hybrydowej podczas zginania.



Rys 2. Wpływ zawartości PMMA i ZS1 na wielkość energii przy zginaniu trójpunktowym żywicy epoksydowej  
Fig. 2. Effect of PMMA and ZS1 content on flexural energy of epoxy resin

Na wykresie 3 przedstawiono zależność wartości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń ( $K_{IC}$ ) od zawartości modyfikatorów poli(metakrylanu metylu) (PMMA) i nanonapełniacza ZS1 w żywicy epoksydowej. Analiza wykresu wykazała, że odporność na pękanie

kompozycji żywicy epoksydowej wzrosła, a następnie malała wraz ze wzrostem zawartości PMMA i ZS1. Największą poprawę odnotowano w przypadku 2% zawartości ZS1 i 5% zawartości PMMA, wynosiła ona ok. 90% względem niezmodyfikowanej żywicy epoksydowej. Jednakże, trzeba zaznaczyć, że dla kompozycji hybrydowej zawierającej 5% PMMA i 2% ZS1 nie zaobserwowano efektu synergizmu.



Rys 3. Zależność krytycznego współczynnika intensywności naprężeń od zawartości PMMA i nanonapełniacza ZS1 w żywicy epoksydowej

Fig. 3. Critical stress intensity factor of epoxy resin as function of PMMA and nanoclay ZS1 content

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań nad wpływem zawartości modyfikatorów poli(metakrylanu metylu) (PMMA) i Nanobentów ZS1 i ZR2 na właściwości kompozytów na bazie żywicy epoksydowej można stwierdzić, że maksymalny wzrost udarności zaobserwowano dla kompozycji, które zawierały 1% ZS1, 1% ZR2 i 5% PMMA. Wzrost wynosił kolejno 40%, 70% i 50% w stosunku do żywicy bez modyfikatora.

W przypadku badania odporności na propagację pęknięcia ( $K_{IC}$ ), największą poprawę właściwości zanotowano dla kompozycji z 2% ZR2, 4% ZS1 i 5% PMMA. Badania wytrzymałości na zginanie trójpunktowe wykazały naj-

większą poprawę właściwości przy dodaniu do czystej żywicy 1% ZR2, 1% ZS1 i 5% PMMA.

W przypadku kompozycji hybrydowych (ZS1 + PMMA), największy wzrost udarności zaobserwowano dla kompozycji na bazie 2% ZS1 i 5% PMMA.

Największą poprawę wytrzymałości na zginanie trójpunktowe jak również odporności na propagację pęknięcia zanotowano dla kompozycji hybrydowych zawierających 5% PMMA i odpowiednio 1% i 2% ZS1.

Występowanie efektu synergizmu zaobserwowano dla kompozycji hybrydowych zawierających:

- 1% ZS1 i 5% PMMA (odkształcenie i energia przy zginaniu trójpunktowym),
- 2% ZS1 i 5% PMMA (udarność i energia kruchości pęknięcia).

Występowanie efektu synergizmu i poprawa właściwości wytrzymałościowych badanych kompozycji może być spowodowana bardzo dobrą kompatybilnością pomiędzy matrycą polimerową a modyfikatorami (PMMA i Nanobent ZS1).

#### LITERATURA

1. Florjańczyk Z., Penczek S.: *Chemia polimerów, tom II*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
2. Żuchowska D.: *Polimery konstrukcyjne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
3. Baran E.: *Światowy rynek żywic epoksydowych*, Rynek Tworzyw, 2008, 2, 39.
4. Spasówka E., Rudnik E., Kijeński J.: *Biodegradowalne nanokompozyty polimerowe część I. Metody otrzymywania*, *Polimery*, 2006, 51, 9, 615.
5. Nicholson J. W.: *Chemia polimerów*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1996.
6. Bakar M.: *Właściwości mechaniczne polimerów*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2009.

Publikację przyjęto do druku: 15.06.2016