

The polymer-matrix composites with metallic fillers for electromagnetic shielding applications

Kompozyty polimerowe z metalicznymi napełniaczami do ekranowania pola elektromagnetycznego

DOI: dx.medra.org/10.12916/przemchem.2014.XX

$CH_2=CH_2/CH_2=CHCOOEt$, $CH_2=CH_2/CH_2=CHMeCOOEt$ and $CH_2=CHCN/CH_2=CH-CH=CH_2/PhCH=CH_2$ copolymers and a waste blend prep. of polyethylene and polyvinyl acetate under lab. conditions were filled with Cu flakes and Ni and Ag powders and then studied for electromagnetic properties by split post dielectric resonator method. With increasing content of Cu filler, dielectric constant and electromagnetic shielding effectiveness also increased. Multilayered sandwich-type polymer composites showed an increasing shielding effectiveness along with reduced cost of manufg.

Wyznaczono elektromagnetyczne właściwości kompozytów polimerowych wytworzonych metodą mieszania i prasowania. Jako osnowy polimerowe zastosowano: kopolimer etylenu z akrylanem etylu, kopolimer etylenu z kwasem metakrylowym, polimer odpadowy, stanowiący mieszaninę polietylenu i octanu winylu oraz terpolimer akrylonitryl-butadien-styren, z dodatkiem płatków miedzi. Metodą rezonatorów wykazano, że wraz ze wzrostem zawartości napełniacza miedzianego wzrasta wartość przenikalności dielektrycznej materiału kompozytowego, co, zgodnie z teorią, związane jest z poprawą właściwości ekranujących.

Jednocześnie materiał kompozytowy wykazuje niewielkie przewodnictwo elektryczne, co ma istotne znaczenie dla pewnych zastosowań w elektronice. Ocenie poddano także kompozyty warstwowe typu *sandwich* wypełnione miedzią, srebrem i niklem. Wykazano, że są to materiały najbardziej obiecujące do wykorzystania w praktyce, ponieważ mają zwiększoną efektywność ekranowania przy mniejszych kosztach produkcji.

Interferencja elektromagnetyczna (EMI) jest rozumiana jako niezamierzony wzajemny wpływ poszczególnych urządzeń elektronicznych przez zakłócenie w sieci lub też przez promieniowanie elektromagnetyczne¹⁾. Ze względu na szybki rozwój przemysłu elektronicznego, militarnego i komunikacyjnego problem zmniejszania zakłóceń EMI staje się coraz ważniejszym elementem działań współczesnego społeczeństwa. Tradycyjnie stosowane materiały do ekranowania promieniowania elektromagnetycznego to osłony metalowe, blachy, siatki metalowe, metalizowane tworzywa. Najczęściej są to materiały drogie, o dużej gęstości, które często ulegają utlenieniu lub innym reakcjom, które powodują spadek ich odporności na korozję²⁾. Spośród materiałów skutecznie ekranujących pole magnetyczne coraz większe zainteresowanie budzą kompozyty polimerowe z udziałem metalicznych napełniaczy. W porównaniu ze stosowanymi obecnie do tego celu osłonami metalowymi polimerowe materiały kompozytowe charakte-



Dr hab. inż. Przemysław ŁOŚ, prof. IchP w roku XXXX ukończył studia na Wydziale YY. Jest kierownikiem Zakładu Analizy i Charakterystyki Materiałów w Instytucie Chemii Przemysłowej. Specjalność – elektrochemia.

* Autor do korespondencji:

Instytut Chemii Przemysłowej, ul. Rydygiera 8, 01-793 Warszawa, tel.: (22) 568-20-61, e-mail: przemyslaw.los@ichp.pl



Dr Aneta ŁUKOMSKA w roku XXXX ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Jest adiunktem w Laboratorium Badawczym POLMATIN w Zakładzie Analizy i Charakterystyki Materiałów Instytutu Chemii Przemysłowej. Specjalność – elektrochemia stosowana, skaningowa mikroskopia elektronowa, nanomateriały, nanokompozyty.

ryzuja się elastycznością i dobrymi właściwościami przetwórczymi, małą gęstością oraz dużą odpornością na korozję. Duże możliwości modyfikacji kompozytów w zakresie wyboru osnowy polimerowej, rodzaju napełniacza, jego zawartości i struktury umożliwiają sterowanie właściwościami elektromagnetycznymi w zależności od konkretnego zastosowania. Szczególne znaczenie przypisuje się materiałom nanokompozytowym, czyli układom, w których co najmniej jeden składnik charakteryzuje się przynajmniej jednym wymiarem nanometrycznym (≤ 100 nm). W takim przypadku oddziaływania występujące na poziomie molekularnym silnie wpływają na końcowe, makroskopowe właściwości kompozytu, ponieważ nanocząstki mają wymiary mniejsze niż długości padających fal elektromagnetycznych i odbijają je w mniejszym stopniu. Stosunkowo duża powierzchnia właściwa nanomateriałów powoduje, że ta część fal elektromagnetycznych, która przeniknęła do wnętrza materiału odda swą energię większej liczbie nanocząstek, co zwiększy efektywność tłumienia³⁾.

Emisji promieniowania elektromagnetycznego z danego urządzenia do otoczenia (lub na odwrót) można przeszkodzić albo poprzez absorpcję tego promieniowania, albo poprzez jego odbicie w innym kierunku. Właściwości materiałów zabezpieczających przed EMI charakteryzuje się ilościowo za pomocą efektywności ekranowania SE_T (*shielding effectiveness*)²⁾, określonej równaniem (1):

$$SE_T = 10 \log(P_{in} / P_{out}) = SE_A + SE_R + SE_I \quad (1)$$

w którym P_{in} oznacza amplitudę składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej padającej na powierzchnię ekranującą, P_{out} amplitudę składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej, która przeniknęła przez powierzchnię ekranującą, SE_A tłumienie absorpcyjne (zmniejszenie amplitudy) fali podczas jej przechodzenia przez wnętrze elementu ekranującego (pochłanianie fali), SE_R tłumienie refleksyjne (zmniejszenie amplitudy) fali podczas jej odbicia od powierzchni ekranującej, a SE_I współczynnik uwzględniający osłabienie fali padającej podczas jej wielokrotnych odbić we wnętrzu elementu ekranującego, zaniedbywalny, gdy $SE_A > 15$ dB.

Parametry SE_A oraz SE_R są ściśle powiązane ze stałą dielektryczną i tangensem kąta δ (kątem stratności)^{2, 4, 5)}. Materiały o wartości $\tan \delta \gg 1$ są dobrymi przewodnikami elektrycznymi, a materiały o $\tan \delta \ll 1$ słabymi przewodnikami elektrycznymi. W przypadku gdy $\tan \delta \gg 1$, właściwości ekranujące materiału są zależne głównie od wartości przewodnictwa, a nie od przenikalności dielektrycznej. W przypadku gdy $\tan \delta \ll 1$, wartość współczynnika przenikalności dielektrycznej odgrywa większą rolę^{4, 5)}.

Elektromagnetyczne właściwości kompozytów polimerowych zależą od wielu czynników, takich jak rodzaj polimeru i napełniacza, zawartość, struktura, wymiary, przewodnictwo elektryczne i przenikalność elektryczna napełniacza^{5, 6)}. W szczególności wartość stosunku długości l do grubości d przewodzących cząstek napełniacza (wartość współczynnika kształtu) odgrywa istotną rolę w przewidywaniu ekranujących właściwości kompozytów polimerowych. Ogólnie, im większy współczynnik kształtu, tym większa przenikalność elektryczna kompozytów polimerowych w odniesieniu do danego stężenia napełniacza⁶⁻¹⁰⁾. Przykładem takiego materiału, w którym wykorzystane są napełniacze o dużym współczynniku kształtu są kompozyty wypełnione włóknami lub nanorurkami węglowymi⁶⁾. Znaną są także

materiały z udziałem włókien miedzianych¹¹⁾, niklowych, stalowych oraz aluminium¹²⁾, których efektywność ekranowania przekracza 50 dB przy minimum 20-proc. zawartości napełniacza. Wpływ rodzaju włókna przewodzącego jako napełniacza, jego zawartości i rozmiarów na efektywność ekranowania kompozytów polimerowych na różnych osnowach szeroko omówiono w publikacji¹³⁾. W celu uzyskania materiału kompozytowego o pożądanych właściwościach ekranujących istotne jest także odpowiednie wymieszanie składników, tak by rozmieszczenie napełniacza w objętości polimeru było równomierne. Procedura wytwarzania kompozytów polimerowych z udziałem proszków i płatków miedzi jest przedmiotem zgłoszenia patentowego¹⁴⁾.

Do ochrony przed promieniowaniem elektromagnetycznym powszechnie stosuje się materiały polimerowe wielowarstwowe, o stosunkowo niewielkiej zawartości napełniacza. W materiałach tych efektywność ekranowania jest większa dzięki zjawisku wielokrotnego odbicia na granicach poszczególnych warstw. Najlepszą miarą efektywności ekranowania jest w tym przypadku dobroć układu Q .

Jednym z głównych potencjalnych zastosowań materiałów kompozytowych z napełniaczem metalicznym są kable komunikacyjne. W zakresie najnowszej generacji kabli komunikacyjnych wciąż mają i będą mieć bardzo szerokie zastosowanie tradycyjne kable miedziane o zupełnie nowych konstrukcjach/konfiguracjach (np. kable kategorii 6 i 7 UTP i STP). Najczęściej stosowanymi do izolacji kabli osnowami polimerowymi są poli(chlorek winylu) (PVC), polipropylen (PP), polietylen (PE) oraz poli(octanu winylu) (EVA), kopolimer etylenu z akrylanem etylu (EEA) i kopolimer etylenu z kwasem metakrylowym (EMA). Materiały te są także stosowane np. do obudów różnych urządzeń elektrycznych.

Właściwości kompozytów polimerowych na osnowie: EVA, PP, PVC, PE-LLD, PE-LD z udziałem płatków i proszków miedzi zostały przedstawione we wcześniejszych publikacjach^{7-9, 14)}. Stwierdzono, że efektywność tych materiałów w ekranowaniu wzrasta wraz ze wzrostem zawartości napełniacza miedzianego i zależy także od jego wymiarów.

W ramach kontynuacji prac nad materiałami o potencjalnym zastosowaniu do ekranowania promieniowania elektromagnetycznego przedstawiono wyniki badań elektromagnetycznych właściwości kompozytów otrzymanych na osnowie różnych polimerów z dodatkiem płatków miedzi i folii miedzianych. Ocenie poddano także kompozyty warstwowe typu *sandwich* z udziałem różnych napełniaczy metalicznych (miedź, srebro, nikiel), które dzięki zjawisku wielokrotnego odbicia na granicach każdej z warstw charakteryzują się większą efektywnością ekranowania przy stosunkowo małej zawartości napełniacza metalicznego.

Część doświadczalna

Materiały

Jako osnowy polimerowe stosowano: kopolimer EMA o masowym wskaźniku szybkości płynięcia $MFR_{190^\circ C/2,16 \text{ kg}} = 2 \text{ g/10 min}$ (Elvaloy®AC1218, DuPont, USA); kopolimer EEA o masowym wskaźniku szybkości płynięcia $MFR_{190^\circ C/2,16 \text{ kg}} = 1 \text{ g/10 min}$ (Elvaloy®AC 2116, DuPont, USA); mieszaninę odpadów zawierającą 86% PE o masowym wskaźniku szybkości płynięcia $MFR_{190^\circ C/2,16}$



Mgr Sylwia KOWALSKA w 2009 roku ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Uniwersytetu Warszawskiego. Jest doktorantką w Instytucie Chemii Przemysłowej. Specjalność – analiza i charakterystyka materiałów.



Dr hab. inż. Regina JEZIÓRSKA, prof. IChP w roku 1984 ukończyła studia na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym Politechniki Warszawskiej. Jest dyrektorem Instytutu Chemii Przemysłowej oraz kieruje Zakładem Technologii i Przetwórstwa Polimerów. Specjalność – materiały polimerowe i biopolimery, kompozyty i nanoukłady wielofunkcyjne.

$\text{kg} = 2,2 \text{ g/10 min}$ (Basell Orlen, Polska) i 14% EVA, o masowym wskaźniku szybkości płynięcia $\text{MFR}_{190^\circ\text{C}/21,6 \text{ kg}} = 18,6 \text{ g/10 min}$ (Teledor P/N 1607738112, Arkema, Francja) oraz terpolimer akrylonitryl-butadien-styren (ABS) o masowym wskaźniku szybkości płynięcia $\text{MFR}_{220^\circ\text{C}/10 \text{ kg}} = 5-9 \text{ g/10 min}$ (Ti-Pure® R-350, DuPont, USA).

Płatki miedzi i folie miedziane otrzymano przez pulsową elektrolizę potencjostatyczną lub galwanostatyczną z wykorzystaniem roztworów przemysłowych i odpadowych z Huty Miedzi KGHM SA w Głogowie oraz z roztworów laboratoryjnych przygotowanych z sześciowodnego siarczynu miedzi (Chempur, Polska). W zależności od rodzaju elektrolizy, czasu trwania pulsów i potencjału można było otrzymać warstwy o różnej grubości i strukturze. Sposób otrzymywania warstw/płatków/folii miedzianych został szczegółowo omówiony we wniosku patentowym i publikacjach^{7-9, 14-17}. Stosowano też płatki miedzi (typ 7200, 150 nm, Ecka Granules, Niemcy) oraz proszek srebra (GoodFellow, Wlk. Brytania), a także płatki niklu otrzymywane przez elektrolizę potencjostatyczną z roztworu po galwanizacji zawierającego $60-70 \text{ g/dm}^3$ jonów Ni^{2+} na katodach stalowych względem anody stalowej oraz z roztworu laboratoryjnego o zawartości niklu 70 g/dm^3 sporządzonego na wzór kąpieli do niklowania elektrochemicznego (mieszanina NiCl_2 i NiSO_4 rozpuszczonych w wodnym roztworze H_3BO_3 o stężeniu 40 g/dm^3 , POCH, Polska). Płatki miedziane oraz niklowe otrzymano przez rozdrobnienie uzyskanej elektrolitycznej folii o grubości ok. 150 nm. Wielkość płatków wahała się w zakresie 15–20 μm , co odpowiadało współczynnikowi kształtu >100 .

Metodyka badań

Napełniacze metaliczne w postaci płatków/folii miedzi i niklu otrzymywano metodą elektrolizy potencjostatycznej i galwanostatycznej^{14, 15} przy użyciu potencjostatu Autolab GSTST30 (Eco Chemie, Holandia) połączony z komputerem typu PC za pomocą karty przetwornika analogowo-cyfrowego.

Kompozyty polimerowe różniące się zawartością napełniacza metalicznego otrzymywano metodą mieszania w stanie uplastycznionym przy użyciu laboratoryjnej wylączarki Plasti-Corder, firmy Brabender, wyposażonej w mieszalnik o pojemności 50 cm^3 . Proces prowadzono w temp. 165°C w przypadku EMA i EEA, 160°C w przypadku PE/EVA oraz w 230°C w przypadku ABS. Stosowano stałą szybkość obrotową ślimaków 60 rpm. Czas mieszania wynosił 10 min. Do oceny właściwości elektromagnetycznych i struktury wykonywano próbki o znormalizowanych wymiarach metodą prasowania przy użyciu prasy hydraulicznej typu Preco w temperaturze charakterystycznej dla przetwarzanego polimeru.

Kompozyty warstwowe wytwarzano przez umieszczenie warstwy napełniacza pomiędzy warstwami odpowiedniego materiału polimerowego, a następnie sprasowanie wszystkich warstw.

Strukturę nadcząsteczkową otrzymanych kompozytów polimerowych oceniano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, firmy Joel JSM 6490-LV, wyposażonego w spektrometr dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego.

Właściwości mechaniczne przy statycznym rozciąganiu oznaczano wg¹⁸, wykorzystując maszynę wytrzymałościową Instron 4505. Pomiary naprężenia i wydłużenia względne przy zerwaniu prowadzono, stosując prędkość posuwu szcęk 5 mm/min.

Do oceny właściwości elektromagnetycznych (przenikalność dielektryczna i tangens kąta stratności) otrzymanych kompozytów polimerowych stosowano oryginalną metodę rezonatorów przy częstotliwości 1,9 GHz oraz 4,7 GHz. Metoda ta została opisana w pracy¹⁹. Dla badanych w niniejszej pracy materiałów w zakresie 0,5–10 GHz mierzone parametry elektromagnetyczne są praktycznie niezależne od częstotliwości^{7, 8, 14, 17}.

Wyniki badań

Przedstawione na rys. 1 mikrofotografie SEM ilustrują strukturę próbek kompozytów polimerowych na bazie EMA, EEA, ABS i mieszaniny odpadów PE/EVA (86/14) z dodatkiem 10% mas. płatków miedzi. W każdym z badanych kompozytów rozkład napełniacza w osnowie polimerowej był równomierny, co oznaczało, że struk-

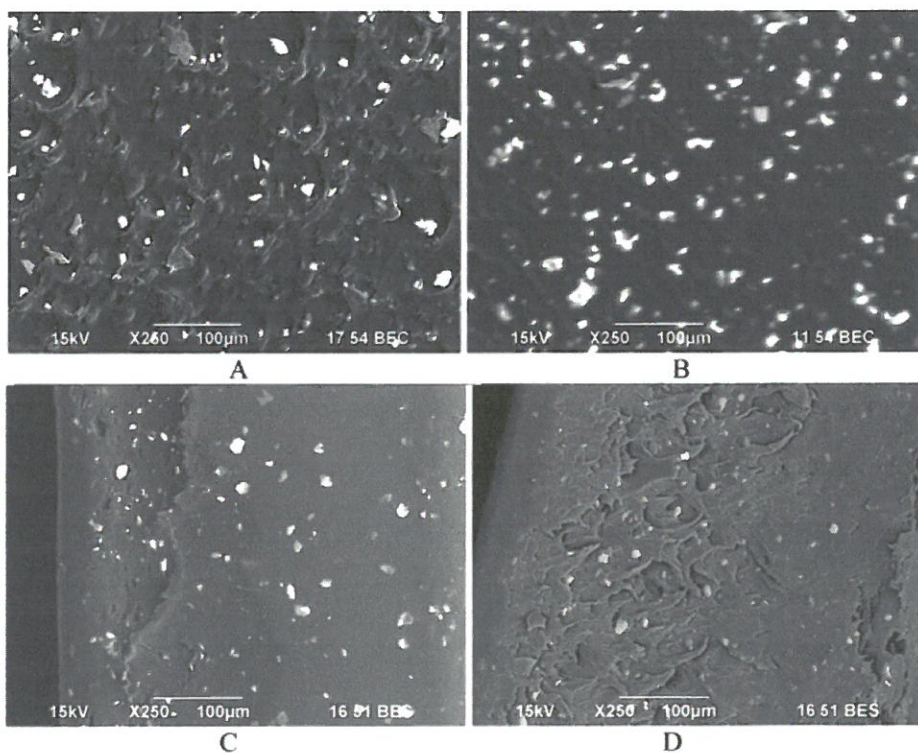


Fig. 1. SEM images of polymer matrix composites with 10% by mass of copper flakes: A – EEA, B – EMA, C – PE/EVA, D – ABS

Rys. 1. Mikrofotografie SEM kompozytów polimerowych zawierających 10% mas. płatków miedzi na osnowie: A – EEA, B – EMA, C – PE/EVA, D – ABS

tura kompozytu była jednolita. Równomierny rozkład napełniacza w osnowie polimerowej otrzymano dla każdej z badanych zawartości napełniacza miedzianego.

Właściwości elektromagnetyczne (przenikalność dielektryczna, tangens kąta stratności) wyznaczone przy częstotliwości 4,7 GHz kompozytów na osnowie EEA, EMA, ABS oraz mieszaniny PE/EVA porównano z właściwościami elektromagnetycznymi kompozytu EVA z udziałem płatków miedzi o grubości ok. 150 nm (tabela 1).



Prof. dr hab. Jerzy KRUPKA w roku XXXX ukończył studia na Wydziale YY. Jest pracownikiem Instytutu Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej oraz Głównego Urzędu Miar. Specjalność – mikrofalowe pomiary elektromagnetyczne właściwości materiałów dielektrycznych, magnetycznych i półprzewodnikowych.

Table 1. Complex permittivity ϵ and loss tangent $\tan\delta$ of polymer matrix composites based on EEA, EMA, PE/EVA, ABS and EVA with copper filler (average thickness 150 nm) measured using split post dielectric resonator method at the frequency 4.7 GHz

Tabela 1. Wyniki badań elektromagnetycznych dla kompozytów polimerowych na osnowie EEA, EMA, PE/EVA, ABS i EVA z udziałem płatków miedzi o grubości 150 nm badanych metodą dzielonych rezonatorów dielektrycznych przy częstotliwości ok. 4,7 GHz

Zawartość napelniaacza, % mas.	EEA		EMA		PE/EVA		ABS		EVA ^{8,9)}	
	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$
0	2,42	0,016	2,42	0,022	2,36	0,001	2,84	0,029	3,52	0,007
1	2,50	0,026	2,54	0,033	2,46	0,010	3,12	0,039	3,58	0,014
2,5	2,67	0,039	2,65	0,044	2,58	0,022	3,20	0,051	3,95	0,024
5	2,92	0,059	2,89	0,062	2,88	0,043	3,57	0,068	4,52	0,047
10	2,80	0,112	3,62	0,097	3,42	0,072	4,31	0,103	5,91	0,059
20	4,93	0,133	5,13	0,128	5,01	0,110	6,37	0,128	9,86	0,103
40	10,77	0,131	10,98	0,130	11,16	0,133	13,14	0,113	24,4	0,106

Dla każdego z badanych kompozytów przenikalność dielektryczna ϵ wzrastała wraz ze wzrostem zawartości napelniaacza. Przy 40-proc. udziale płatków miedzi wartość ϵ wynosiła: 10,77 dla EEA, 10,98 dla EMA, 11,16 dla PE/EVA oraz 13,14 dla ABS. Różnice pomiędzy wartościami współczynników przenikalności dielektrycznej dla badanych kompozytów były więc nieznaczne. Tangens kąta stratności rósł wraz ze wzrostem zawartości napelniaacza, osiągając przy zawartości ok. 20% stosunkowo niewielką wartość wynoszącą 0,11–0,13, a następnie osiągał plateau. Badane kompozyty polimerowe charakteryzowały się więc małym przewodnictwem elektrycznym, podczas gdy ich przenikalność dielektryczna była stosunkowo duża, co wskazywało na właściwości ekranujące. Porównując te wartości z danymi otrzymanymi dla kompozytów polimerowych na bazie EVA (wartość ϵ dla 40-proc. zawartości napelniaacza wynosiła 24,4), można było stwierdzić, że właściwości ekranujące kompozytów na osnowie EEA, EMA, ABS, PE/EVA były zbliżone, ale mniejsze niż badanych wcześniej kompozytów EVA.

W tabeli 2 zestawiono wyniki badania właściwości mechanicznych kompozytów polimerowych na osnowie EEA, EMA, ABS, PE+EVA (oraz w celach porównawczych dla EVA) z udziałem płatków miedzi o grubości ok. 150 nm. Stwierdzono, że właściwości tych kompozytów bardzo silnie zależały od osnowy polimerowej. Dla wszystkich badanych osnów polimerowych dodatek płatków miedzi o grubości 150 nm nie zmieniał w sposób znaczący naprężenia przy zerwaniu aż do 20% zawartości napelniaacza. Dla większości materiałów następowało skokowe obniżenie wydłużenia względnego przy zerwaniu przy zawartości napelniaacza 10–15%. W przypadku kompozytów na osnowach EEA, EMA i PE+EVA wydłużenie względne przy 40-proc. zawartości napelniaacza zmniejszało się o ok. 20%, co może oznaczać,

Table 2. Mechanical properties of polymer composites filled with copper flakes (average thickness 150 nm)

Tabela 2. Właściwości mechaniczne kompozytów polimerowych z udziałem płatków miedzi o grubości 150 nm

Zawartość, % mas.	Naprężenie przy zerwaniu, MPa					Wydłużenie względne przy zerwaniu, %				
	EMA	EEA	ABS	PE+EVA	EVA ⁸⁾	EMA	EEA	ABS	PE+EVA	EVA ⁸⁾
0	14,70	17,85	31,9	16,8	10,3	1010	1036	39,9	770,2	151
1	14,67	17,82	33,5	16,8	11,9	977	1034	42,0	820,9	181
2,5	14,32	17,88	33,7	16,1	12,1	969	1035	87,6	802,7	191
5	14,35	17,86	34,5	15,6	12,1	949	1032	51,2	777,7	172
10	14,16	17,34	35,1	15,7	11,6	943	1006	33,2	788,1	145
20	14,18	17,05	33,8	15,7	11,4	911	971	4,6	788,0	95
40	13,16	14,42	26,6	13,3	13,7	763	809	2,5	622,5	24

że materiały te mogą mieć znaczenie praktyczne nawet przy tak dużej zawartości napelniaacza.

Strukturę kompozytu polimerowego, w którym pomiędzy warstwami czystego polimeru umieszczona była warstwa metalicznego napelniaacza przedstawiono na rys. 2. W tabeli 3 zestawiono wyniki badań elektromagnetycznych właściwości kompozytów polimerowych typu sandwich z udziałem płatków

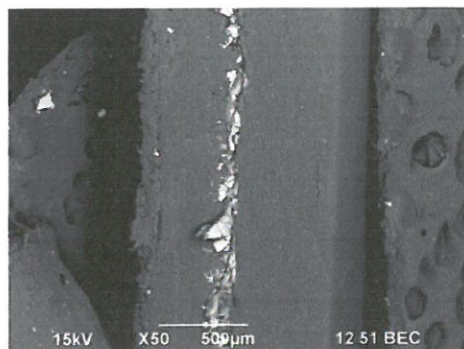


Fig. 2. The SEM image of sandwich type polymer composite (EVA/copper filler/EVA)

Rys. 2. Obraz SEM kompozytu warstwowego typu sandwich na osnowie EVA (EVA/napelniaacz miedziowy/EVA)

Table 3. Complex permittivity ϵ , loss tangent $\tan\delta$, and quality factor Q of sandwich type polymer matrix composites based on EEA, EMA, PE+EVA, ABS and EVA with electrochemically obtained copper filler, measured using split post dielectric resonator method at the frequency 1.9 GHz

Tabela 3. Wyniki elektromagnetycznych badań warstwowych kompozytów polimerowych typu sandwich na osnowie EEA, EMA, PE/EVA, ABS i EVA z udziałem otrzymanych elektrochemicznie płatków miedzi badanych metodą dzielonych rezonatorów dielektrycznych przy częstotliwości ok. 1,9 GHz

Polimer	Zawartość płatków Cu, % mas.	ϵ	$\tan\delta$	Q
EEA	5	6,65	0,103	689
EMA	5	6,69	0,109	544
ABS	1,8	11,72	0,250	40
PE/EVA	1,7	6,99	0,009	227
EVA ^{8,9)}	3	90,38	0,073	78

miedzi otrzymanych przez rozdrobnienie cienkiej folii miedzianej uzyskanej w wyniku pulsowej elektrolizy galwanostatycznej^{8, 14, 15}. W przypadku tych kompozytów nawet niewielki udział napelniaacza powodował znaczny wzrost przenikalności dielektrycznej w porównaniu z kompozytami jednowarstwowymi. Przedstawione w tabeli 3 dane dotyczą różnego udziału napelniaacza w warstwie wewnętrznej, co

wynikało z konieczności normalizacji próbek do oceny właściwości elektromagnetycznych (sprasowane płytki o wymiarach 10 × 10 cm i całkowitej grubości ok. 1 mm). Przy zmiennej gęstości osnowy polimerowej i podobnej masie dodanego napelniaacza, udział masowy napelniaacza w całości kompozytu był zróżnicowany. Pomimo różnic w zawartości napelniaacza w objętości kompozytu polimerowego, z zestawionych w tabeli 3 danych, można wnioskować, że rodzaj osnowy polimerowej w tego rodzaju kompozytach miał duże znaczenie. Spośród badanych kompozytów najlepszymi właściwościami ekranującymi promieniowanie elektromagnetyczne charakteryzowały się te na osnowie EVA, a najgorszymi na osnowie EEA i EMA.

W celu zbadania wpływu rodzaju metalu zastosowanego jako napelniazacz oceniono poddano także kompozyty warstwowe z udziałem płatków niklu oraz proszku srebra. W tabeli 4 porównano właściwości elektromagnetyczne kompozytów na bazie EEA, EMA oraz EVA z udziałem miedzi, niklu i srebra w postaci proszków i płatków. Wartości stałej dielektrycznej kompozytów z napelniazaczem otrzymanym przez rozdrobnienie folii miedzianej lub niklowej otrzymanej elektrolitycznie były znaczenie większe, niż w przypadku napelniazczy handlowych. Przewaga napelniazczy otrzymanych elektrolitycznie nad handlowymi wynikała prawdopodobnie z ich dużej czystości (powierzchnia nie była utleniona i nie była pokryta warstwą tlenku) i dużej wartości współczynnika kształtu. Można było zauważyć, że kompozyty na bazie EEA i EMA miały bardzo zbliżone właściwości elektromagnetyczne. Podobnie jak dla kompozytów jednowarstwowych najlepsze wyniki w układzie wielowarstwowym typu *sandwich* uzyskano dla osnowy typu EVA⁹⁾.

Podsumowanie

Zbadano właściwości elektromagnetyczne kompozytów polimerowych na osnowie EEA, EMA, PE/EVA, ABS oraz EVA z udziałem napelniazczy metalicznych w postaci proszków i płatków. Stwierdzono, że badane kompozyty polimerowe charakteryzują się małym przewodnictwem elektrycznym, podczas gdy ich przenikalność dielektryczna jest stosunkowo duża, co wskazuje na dobre właściwości ekranujące. Wykazano, że najbardziej obiecującymi materiałami do wykorzystania w praktyce są materiały warstwowe, ponieważ wykazują większą efektywność ekranowania przy mniejszych kosztach produkcji. Spośród badanych kompozytów, zarówno jedno-, jak i wielowarstwowych typu *sandwich*, najlepsze właściwości elektromagnetyczne wykazują kompozyty na osnowie EVA. Ponadto stwierdzono, że stała dielektryczna kompozytów z dodatkiem napelniazczy otrzymanego przez rozdrobnienie folii miedzianej czy niklowej otrzymanej elektrolitycznie jest znaczenie większa, niż w przypadku napelniazczy handlowych.

Podziękowania

Autorzy dziękują firmie Qwed Sp. z o. o. z Warszawy za przeprowadzenie badań właściwości elektromagnetycznych.

Otrzymano: 27-09-2013

Table 4. Complex permittivity, ϵ , loss tangent, $\tan\delta$, and quality factor, Q , of sandwich type polymer composites based on EEA, EMA, and EVA with various metallic fillers, measured by using split post dielectric resonator method at the frequency 1.9 GHz

Tabela 4. Wyniki elektromagnetycznych badań warstwowych kompozytów polimerowych typu *sandwich* na osnowie EEA, EMA, EVA z udziałem różnych napelniazczy metalicznych badanych metodą dzielonych rezonatorów dielektrycznych przy częstotliwości ok. 1,9 GHz

Polimer	Napelniazcz											
	Ni (płatki)				Cu (płatki 150 nm)				Ag (proszek)			
	Zawartość, % mas.	ϵ	$\tan\delta$	Q	Zawartość, % mas.	ϵ	$\tan\delta$	Q	Zawartość, % mas.	ϵ	$\tan\delta$	Q
EEA	2,0	7,60	0,126	416	10,0	4,54	0,094	1144	5,7	6,87	0,079	905
EMA	2,0	4,20	0,134	702	9,7	5,09	0,102	952	5,5	5,21	0,173	558
EVA	0,7	90,48	0,194	28	7,3	19,74	0,121	670	5,7	14,86	0,287	123

LITERATURA

1. H. Saechtling, *Tworzywa sztuczne*, WNT, Warszawa 2000.
2. A.A. Al-Ghamdi, F. El-Tantawy, *Composites*, A 2010, **41**, 1693.
3. J. Majewski, *Tworzywa Sztuczne Chemia* 2007, **4**, str.?
4. Z. Liu, G. Bai, Y. Huang, Y. Ma, F. Du, F. Li, T. Guo, Y. Chen, *Carbon* 2007, **45**, 821.
5. D.D.L. Chung, *Carbon* 2001, **39**, 279.
6. L.L. Wang, B.K. Tay, K.K. See, Z. Sun, L.K. Tan, D. Lua, *Carbon* 2009, **47**, 1905.
7. P. Łoś, A. Łukomska, S. Kowalska, R. Jeziórska, J. Krupka, *Polimery* 2011, nr 4, 324.
8. P. Łoś, A. Łukomska, S. Kowalska, R. Jeziórska, J. Krupka, *Polimery* 2012, nr 5, 338.
9. P. Łoś, A. Łukomska, S. Kowalska, R. Jeziórska, J. Krupka, *Mat. konf. Nanocomposites Modest Workshop*, Warszawa, 8–10 września 2013 r.
10. P. Łoś, A. Łukomska, S. Kowalska, R. Jeziórska, J. Krupka, [w:] *Modyfikacja polimerów. Stan i perspektywy w roku 2011* (red. R. Steller), Wyd. Tempo, Wrocław 2011, 259–263.
11. K.B. Cheng, S. Ramakrishna, K.C. Lee, *Composites*, A 2000, **31**, 1039.
12. L. Li, D.D.L. Chung, *Composites* 1994, **25**, 215.
13. S.T. Tan, M.Q. Ming, M.Z. Rong, H.M. Zeng, F.M. Zhao, *Polym. Polym. Compos.* 2001, **9**, 257.
14. *Zgł. pat. pol.* P-392282 (2010).
15. P. Łoś, A. Łukomska, A. Plewka, *Pat. pol.*: P-387565 (2012), PCT PL2010/000022.
16. P. Łoś, A. Łukomska, S. Kowalska, *Rudy Metale* 2012, **R57**, 42.
17. P. Łoś, A. Łukomska, S. Kowalska, R. Jeziórska, P. Zaprzalski, J. Krupka, *Mater. Sci.* 2011, **29**, 35.
18. PN-EN ISO 527-2:1998 *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań folii i płyt*.
19. J. Krupka, K. Derzakowski, J.G. Hartnett, *Meas. Sci. Technol.* 2009, **20**, 1.