

doi:10.15199/48.2017.12.14

Wpływ składu kompozytu żelazo-polimer na właściwości ekranujące fale elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości ekranujących kompozytu żelazo-polimer. Omówiono pokrótce proces wytwórczy próbek. Opisano także stanowisko pomiarowe i zaprezentowano wyniki pomiarów. Podczas badań mierzono poziom tłumienia fali elektromagnetycznej wielkiej częstotliwości. Przedstawiono także teoretyczny opis poziomu tłumienia fali w kompozycie domieszkowanym metalem.

Abstract. The article presents the results of studies on shielding properties of the iron-polymer composite. The production process of samples is briefly discussed. The measurement station was also described and the results of the measurements were presented. During the tests, the attenuation level of electromagnetic wave of high frequency was measured. A theoretical description of the wave attenuation level in a metal doped composite has also been presented. (The effect of composition of iron-polymer composite on shielding properties for electromagnetic waves of high frequency)

Słowa kluczowe: ekranowanie elektromagnetyczne, kompozyty polimer-metal, materiały ekranujące.

Keywords: electromagnetic shielding, polymer-metal composites, shielding materials.

Wprowadzenie

Powszechność promieniowania elektromagnetycznego rodzi problemy z jego nadmiarem tam, gdzie jest to niepożądane. Zachodzi to przede wszystkim w dwóch przypadkach: niechcianego wpływu na różne urządzenia elektryczne i elektroniczne oraz niekorzystnego wpływu na organizmy biologiczne. Pierwszy przypadek związany jest z kompatybilnością elektromagnetyczną urządzeń i ich podatnością na zakłócenia elektromagnetyczne. Z kolei niekontrolowany wpływ pól i fal elektromagnetycznych na organizmy żywe odczuwany jest w różny sposób – od złego samopoczucia przez ból głowy po poważne zaburzenia funkcjonowania poszczególnych organów. Dlatego istotnym aspektem współczesnej techniki jest unikanie nadmiernego wytwarzania promieniowania oraz jego eliminacja lub unikanie [1, 2]. Obecny poziom rozwoju cywilizacji skazuje ludzi i inne organizmy biologiczne na pola i fale elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości. W ostatnich latach powstało mnóstwo źródeł pól i fal o częstotliwościach gigahercowych. Należą do nich chociażby sieci komórkowe GSM, LTE, bezprzewodowe sieci lokalne 2,4 GHz i 5 GHz oraz wiele innych systemów opartych na bezprzewodowej komunikacji. Co prawda, jednostkowo urządzenia te emitują małą ilość promieniowania elektromagnetycznego, lecz przy sporym zagęszczeniu urządzeń natężenie tego pola znacznie wzrasta.

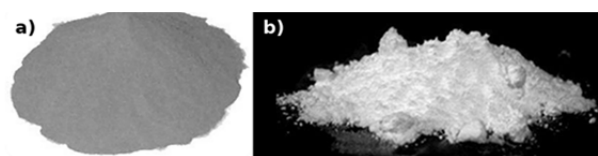
Jednym ze sposobów ograniczenia wpływu istniejącego promieniowania na urządzenia oraz organizmy jest stosowanie odpowiednich ekranów oraz obudów. W tym celu stosuje się przewodzące osłony, ale także poszukuje się nowych materiałów, które byłyby tańsze i lżejsze niż tradycyjnie stosowane metale i ich stopy. Uwagę badaczy przyciągają przede wszystkim różnego rodzaju kompozyty z domieszkami przewodzącymi. Przykładowo, Kim et al. [3] prowadzili badania nad kompozytami poliestrowymi domieszkowanymi polimerami przewodzącymi (polipirol) przy częstotliwościach do 1,5 GHz. Zgodnie z oczekiwaniem, właściwości ekranujące kompozytu wzrastają wraz ze wzrostem jego przewodnictwa. Tzeng i Chang [4] analizowali właściwości ekranujące pole elektromagnetyczne przez kompozyty ABS wzmocnione włóknami miedzianymi i niklowymi. Innowacją w temacie EMI (the electromagnetic interference) stało się zastosowanie nanorurek węglowych. Opis i wyniki badań dotyczące właściwości kompozytów polimer-nanorurki węglowe można odnaleźć w pracach takich autorów, jak Thomassin et al. [5] oraz Al-Saleh i Sundararaj [6]. Dlatego

też badania nad nowymi materiałami ekranującymi są wskazane i aktualne.

Niniejsza praca jest częścią szerszej prowadzonych badań nad możliwością wytworzenia różnego rodzaju kompozytów polimerowych domieszkowanych różnymi wypełniaczami pod kątem zastosowania ich do ekranowania pól elektromagnetycznych w zakresie wielkich częstotliwości [7, 8]. W ramach przeprowadzonych badań zostały wykonane próbki kompozytowe z bazą w postaci polichlorku winylu (PVC), który spełnia rolę spoiwa dla materiału domieszkującego (rys. 1). W tym przypadku jako domieszkę zastosowano sproszkowane żelazo (rys. 2a). Otrzymane wyniki będą punktem odniesienia dla kolejnych próbek, w których planuje się zastosować różnego rodzaju materiały odpadowe, jak i pochodzące z recyklingu.



Rys.1. Budowa materiału kompozytowego



Rys.2. Widok sproszkowanych komponentów a) proszek Fe, b) proszek PVC [8]

Materiały

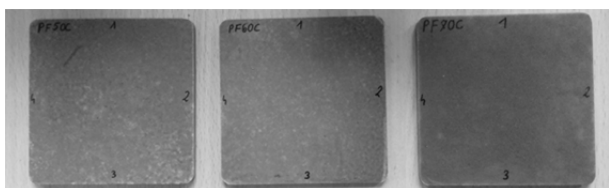
Do wykonania pierwszej partii próbek (PFe50, PFe60, PFe70) wykorzystano czyste materiały. Granulat PVC poddano sproszkowaniu, aby uzyskać sypką i dobrze mieszalną postać. Następnie uzyskany proszek przesiano w wyrząsarce wibracyjnej. Przesianiu poddano także sproszkowane żelazo. Dzięki temu zabiegowi uzyskano

materiały o dość jednorodnej wielkości ziaren. Do sporządzenia mieszaniny kompozytowej użyto komponentów o granulacji 100-150 μm . Po dokładnym odważeniu składników w obranych proporcjach, obydwa składniki umieszczono w mieszalniku rotacyjnym i poddano procesowi mieszania przez czas ok. 5 min. Dzięki temu obydwa składniki zostały dobrze ze sobą wymieszane. Tak przygotowaną mieszankę umieszczono w stalowej formie, na której zamontowano element grzejny. Całość umieszczono w prasie hydraulicznej i poddano naciskowi 30 ton, co po uwzględnieniu rozmiarów próbki odpowiada ok. 50 MPa (rys. 3.). Po osiągnięciu temperatury 150-160 $^{\circ}\text{C}$ utrzymywano ją przez ok. 30 min, zachowując stały nacisk.



Rys.3. Wytwarzanie próbek kompozytowych – prasa hydrauliczna wraz ze stalową formą i opaską grzejną

Po zakończeniu wygrzewania próbkę pozostawiono pod naciskiem aż do wystygnięcia. Dzięki wysokiej temperaturze i dużemu naciskowi pozbyto się z mieszaniny nadmiaru powietrza, uzyskując dość jednolity materiał. Przedstawiony sposób wytwórczy można także zastosować do uzyskiwania rdzeni z materiałów miękkich magnetycznie SMC [9]. Powstałe wypraski miały kwadratowy kształt i grubość od 4 do 4,5 mm (rys. 4.). Wytworzono trzy próbki o zróżnicowanej procentowej zawartości domieszki. Ilustruje to Tabela 1.



Rys.4. Przygotowane wypraski kompozytowe PVC-Fe

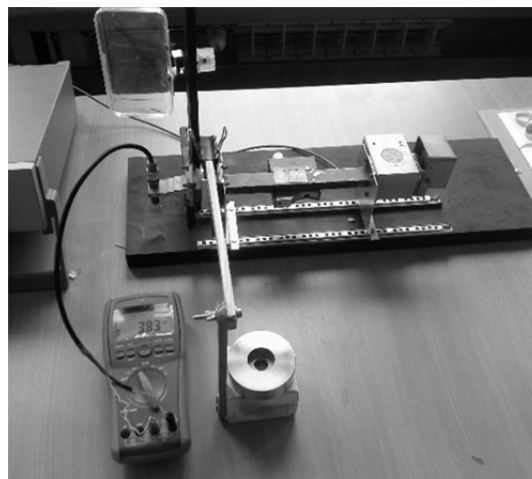
Tabela 1. Skład procentowy kompozytów polimerowych

Próbka	PFe50	PFe60	PFe70
PVC,%	50	60	70
Fe,%	50	40	30

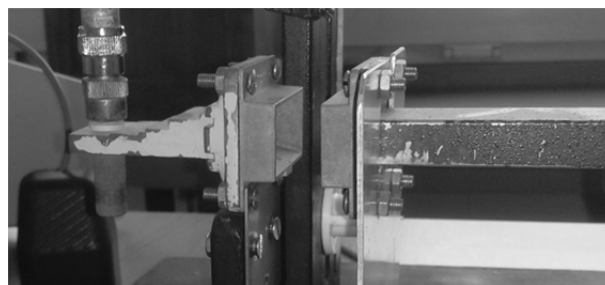
Pomiary

Wytworzone kompozyty poddano badaniom na zdolność do ekranowania fal elektromagnetycznych w zakresie wielkich częstotliwości. W tym celu wykorzystano otwarty na jednym końcu falowód zasilany z generatora FVC99 VCO 10 GHz (WORK Microwave GmbH Holzkirchen) – długość fali w powietrzu 3 cm. Na końcu falowodu zamontowano antenę tubową, a w odległości 1 cm

znajdowała się druga antena tubowa odbiornika z detektorem mikrofalowym MDL 90DH389-1R (Microwave Development Laboratories) (rys. 5.). Napięcie wyjściowe detektora, mierzone było multimetrem cyfrowym. W szczelinie pomiędzy otwartym końcem falowodu, a anteną (rys. 6.) umieszczana była badana płytka kompozytowa. Pomiarów dokonywano dla trzech położzeń płytki: A – tuż przy antenie odbiorczej, B – pośrodku między wyjściem falowodu, a anteną odbiorczą, C – tuż przy wylocie falowodu. W każdym położeniu pomiaru dokonywano dla kilku miejsc płytki, a za wynik przyjęto średnią z tych pomiarów (Tabela 2).



Rys.5. Widok stanowiska pomiarowego



Rys.6. Widok falowodu i detektora mikrofalowego

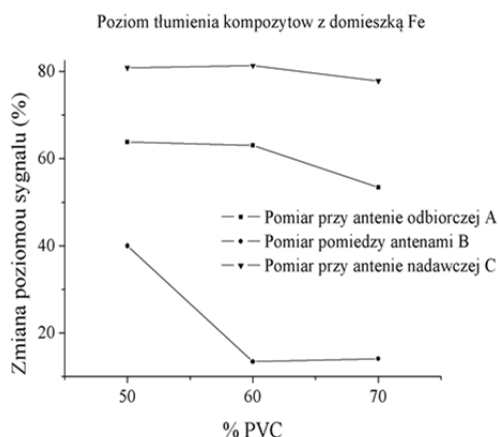
Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów

Kompozyt	Grubość, mm	Napięcie wyjściowe detektora, mV			
		Bez płytki	A	B	C
50% żelaza	4,5	14,26	5,16	8,56	2,73
40% żelaza	4,0	14,26	5,27	12,35	2,66
30% żelaza	4,3	14,28	6,65	12,27	3,16
50% żelaza	4,5	-	0,36	0,60	0,19
40% żelaza	4,0	-	0,37	0,87	0,19
30% żelaza	4,3	-	0,47	0,86	0,22

Na podstawie zmierzonych napięć obliczono tłumienie fali elektromagnetycznej podczas przejścia przez płytkę. Charakterystyka detektora w rozpatrywanym zakresie napięć (do kilkudziesięciu miliwoltów) podaje, że napięcie jest proporcjonalne do mocy fali. Stąd tłumienie mocy fali jest równe ilorazowi napięcia wyjściowego zmierzonego w obecności płytki do napięcia wyjściowego zmierzonego bez płytki. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rysunku 7.

Tłumienie fali rośnie wraz ze wzrostem procentowej zawartości żelaza, a więc zgodnie z oczekiwaniami. Zauważalne jest także, że tłumienie jest uwarunkowane

położeniem płytki (miejsce A, B, C) w szczelinie pomiędzy końcem falowodu, a anteną odbiorczą detektora. Jest to prawdopodobnie spowodowane sposobem rozchodzenia się fali z otwartego końca falowodu (nie jest to fala płaska) oraz niecentralnym położeniem płytki w szczelinie (ograniczenia związane z mocowaniem falowodu i anten).



Rys.7 Tłumienie fali EM o częstotliwości 10 GHz przez poszczególne próbki w zależności od jej położenia w szczelinie

Rozważania teoretyczne

Rozważania teoretyczne zostaną przeprowadzone przy założeniu, że fala elektromagnetyczna jest płaska, monochromatyczna i rozchodzi się w nieskończone rozległym ośrodku 1. Rozpatrzmy przejście takiej fali przez płytę o grubości d (ośrodek 2). Zakładając, że płyta ma rozmiary znacznie większe od długości fali, a fala pada na płytę prostopadłe, otrzymuje się następujące wyrażenie na współczynnik transmisji mocy fali elektromagnetycznej przez płytę:

$$(1) \quad T = \left| 4\eta \frac{\exp(-\Gamma_2 d)}{(1+\eta)^2 - (1-\eta)^2 \exp(-2\Gamma_2 d)} \right|^2, \quad \eta = \frac{\zeta_2}{\zeta_1}$$

gdzie ζ_1 i ζ_2 są impedancjami falowymi otoczenia i płyty, a Γ_2 – współczynnikiem propagacji fali w płycie. Jeśli przyjąć, że otoczenie płyty jest powietrzem, to

$$(2) \quad \zeta_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \Omega$$

Natomiast płyta w ogólności wykazuje właściwości przewodzące, czyli (np. [10])

$$(3) \quad \Gamma_2 = \sqrt{j\omega\mu_r\mu_0(\gamma + j\omega\epsilon_r\epsilon_0)} = j\frac{\omega}{c}\sqrt{\mu_r(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')}$$

$$(4) \quad \zeta_2 = \sqrt{\frac{j\omega\mu_r\mu_0}{\gamma_2 + j\omega\epsilon_r\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r' - j\epsilon_r''}}$$

gdzie μ_r , ϵ_r oraz γ są odpowiednio przenikalnością magnetyczną względną, przenikalnością elektryczną względną i przewodnością elektryczną materiału płyty, ω – pulsacją fali, a ϵ_r' oraz ϵ_r'' są częścią rzeczywistą i urojoną przenikalności zespolonej, przy czym ta ostatnia uwzględnia także przewodność elektryczną jako $\gamma/\omega\epsilon_0$. Wielkości materiałowe płyty należy uważać za wypadkowe (efektywne), tzn. charakteryzujące kompozyt w sposób zastępczy. Do ich teoretycznego określenia można

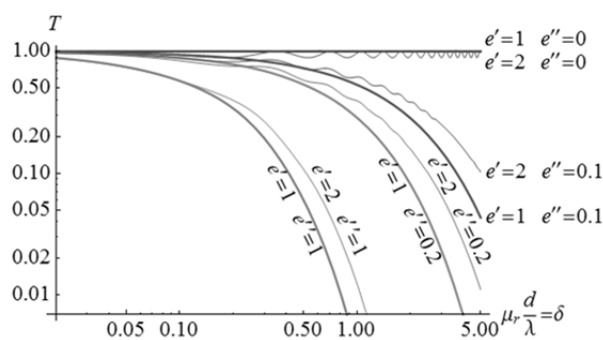
zastosować jedną z teorii medium efektywnego (np. Maxwella-Garneta, Bruggemana, McLachlana). W ogólności zależą one nie tylko od składu kompozytu, ale także od częstotliwości fali elektromagnetycznej. Wprowadzając oznaczenia

$$(5) \quad e' = \frac{\epsilon_r'}{\mu_r}, \quad e'' = \frac{\epsilon_r''}{\mu_r}, \quad \delta = \mu_r \frac{d}{\lambda}$$

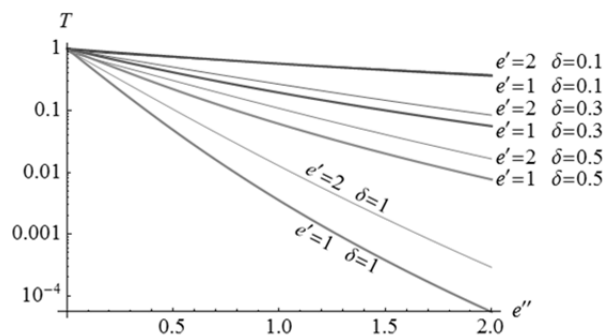
otrzymuje się

$$(6) \quad \eta = \frac{1}{\sqrt{e' - je''}}, \quad \Gamma_2 d = j2\pi\delta\sqrt{e' - je''}$$

Z drugiej zależności wynika, że μ_r efektywnie powiększa grubość płyty z d na $\mu_r d$ (przy stałych e' i e''). Zatem w dalszym ciągu można skupić się na zależności T od e' , e'' oraz $\mu_r d/\lambda$ – tę ostatnią wielkość oznaczono przez δ . Na rysunku 8 pokazano zależność $T(\delta)$ dla różnych e' i e'' , a na rysunku 9 – $T(e'')$ dla różnych e' i δ .



Rys.8. Zależność współczynnika T od δ dla różnych e' i e''



Rys.9. Zależność współczynnika T od e'' dla różnych e' i δ

Powstaje pytanie, w jakim stopniu na podstawie pomiaru tłumienia fali przy przejściu przez płytkę można określić efektywne parametry materiałowe płyty. Przy danej grubości płyty i danej długości fali znany jest iloraz d/λ , ale nie $\mu_r d/\lambda$. Analizując wykres $T(\delta)$ i przyjmując pewną wartość μ_r , otrzymuje się punkt we współrzędnych (δ, T) . Przez taki punkt przechodzi na ogół wiele krzywych zależnych od e' i e'' , co uniemożliwia jednoznaczne określenie wartości tych parametrów. Co więcej, wskutek niepewności pomiarowych punkt (δ, T) rozmywa się do pewnego obszaru wokół tego punktu, co dodatkowo utrudnia identyfikację parametrów. Zatem znajomość T , d i λ nie wystarcza do określenia μ_r , ϵ_r' i ϵ_r'' bez dodatkowych założeń lub pomiarów, ale w praktyce to właśnie znajomość T w funkcji d jest istotna i często wystarczająca.

Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość uzyskania kompozytów polimer-metal mających stosunkowo dobre właściwości ekranujące fale elektromagnetyczne w zakresie około 10 GHz. Dalsze badania ukierunkowane będą na domieszki w postaci różnych materiałów odpadowych, np. odpadowej rudy cynku, a także materiałów pochodzących z recyklingu.

Autorzy: mgr inż. Damian Bambynek, Politechnika, Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: d.bambynek@gmail.com; dr inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroenergetyki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: adam.jakubas@gmail.com; dr hab. inż. Paweł Jabłoński, Politechnika Częstochowska, Katedra Elektrotechniki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: paweljablonski7@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Sonoda K., Teirikangas M., Juuti J., Moriya Y., Effect of surface modification on dielectric and magnetic properties of metal powder/polymer nanocomposites, *J. Magn. Magn. Mater.*, 323 (2011), 2281-2286
- [2] De Paulis F., Nisanci M. H., Orlandi A., Koledintseva M. Y., Drewniak J., Design of homogeneous and composite materials from shielding effectiveness specifications, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 56 (2014), 2, 343-351
- [3] Kim M. S. et al., PET fabric/polypyrrole composite with high electrical conductivity for EMI shielding, *Synthetic Metals*, 126 (2002), 2, 233-239
- [4] Tzeng S.S., Chang F.Y., EMI shielding effectiveness of metal-coated carbon fiber-reinforced ABS composites, *Materials Science and Engineering*, A302 (2001), 258-267
- [5] Thomassin J.M. et al., Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74 (2013), 7, 211-232
- [6] Al-Saleh M.H., Sundararaj U., Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites, *Carbon*, 47 (2009), 7, 1738-1746
- [7] Kollár P., Füzér J., Bureš R., Fáberová M., AC magnetic properties of Fe-based composite materials, *IEEE Trans. Magn.* 46 (2010), 467-470
- [8] Bambynek D., Jakubas A., Jabłoński P., Badanie możliwości ekranowania pola elektromagnetycznego przez wybrane kompozyty polimerowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), 1, 121-124
- [9] Jakubas A., Gębara P., Seme S., Gnatowski A., Chwastek K., Magnetic properties of SMC cores produced at low compacting temperature, *Acta Phys. Pol. A*, 131(2017), 5, 1289-1293
- [10] Piątek Z., Jabłoński P., Podstawy teorii pola elektromagnetycznego, WNT, Warszawa 2015