

# ARTYKUŁY

## MODYFIKOWANE RADIACYJNIE KOMPOZYTY POLIMEROWE W OCHRONIE PRZED PROMIENIOWANIEM MIKROFALOWYM

### *Radiation modified polymer composites in protection from microwave radiation*

Wojciech Głuszewski, Roman Kubacki, Maria Rajkiewicz

**Streszczenie:** Niezabezpieczone odpowiednio urządzenia i podzespoły elektroniczne, w których znajdują się układy scalone ulegają bezpowrotnemu zniszczeniu pod wpływem wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych - HPM [1]. Urządzenia generujące HPM mogą być zastosowane do działań wojskowych, ale również w celach terrorystycznych [2]. W artykule podsumowano wyniki wstępnych badań w zakresie radiacyjnej modyfikacji kompozytów polimerowych skutecznych w ochronie przed działaniem promieniowań mikrofalowych i radiowych. Prace dotyczyły konkretnego zadania - znalezienia absorbera do pomiarów na otwartych poligonach badawczych. Zbadano pod tym kątem modyfikowany radiacyjnie kompozyt: szkło metaliczne, grafit, elastomer Engage 8200.

**Abstract:** Improperly secured electronic devices and components, which include integrated circuits are irrevocably destroyed by high power electromagnetic pulse - HPM [1]. HPM generating device can be used for military operations, but also for terrorist purposes [2]. The article summarizes the results of preliminary research in the field of radiation modification of polymer composites effective in protecting against microwave and radio radiations. The work was related to a particular task - finding absorber for measurements on open research proving grounds. From this angle radiation modified composites were examined: metallic glass, graphite, elastomer Engage 8200.

**Słowa kluczowe:** polimerowe kompozyty, promieniowanie mikrofalowe, sieciowanie radiacyjne, impuls elektromagnetyczny

**Keywords:** polymer composites, microwave radiation, radiation crosslinking, high power microwaves

#### Ochrona przed impulsem elektromagnetycznym wielkiej mocy (IEM)

Impuls elektromagnetyczny wielkiej mocy określane, jako HPM (z ang. High Power Microwaves) jest to impuls o bardzo krótkim czasie trwania (rzędu nanosekund) i o wielkiej mocy (rzędu kilku gigawatów). Moc impulsów jest od 1 000 do 10 000 razy wyższa, a czas trwania od 500 do 1000 razy krótszy od impulsów radarowych. Urządzenia emitujące impulsy HPM często nazywane są bombą E lub bronią elektromagnetyczną ze względu na możliwość powodowania nieodwracalnych uszkodzeń sprzętu elektronicznego znajdującego się w zasięgu ich rażenia.

Impuls elektromagnetyczny powstaje również podczas wybuchu jądrowego. Emitowane wówczas promieniowanie gamma jonizuje powietrze, a wybitym elektronom nadaje kierunek ruchu zbliżony do kierunku rozprzestrzeniania się promieniowania  $\gamma$ . Przyspieszane w ten sposób elektrony są źródłem promieniowania elektromagnetycznego. Impuls jest tak silny, że uwzględnia się go, jako jeden z czynników rażenia. Przy odpowiednim przewodzeniu wybuchu może on odgrywać pierwszoplanową rolę (NEMP - Nuclear Electromagnetic Pulse). W literaturze można znaleźć opis skutków zdetonowanej w roku 1962 bomby wodorowej o mocy 1,4 megaton. Wybuchu doko-

nano na środkowym Pacyfiku na wysokości 30 km. Zniszczone zostały wówczas wykorzystywane w pobliżu instalacje satelitarne oraz doszło do blokady łączności radiowej na Pacyfiku na ok. 30 minut. Zakłócone zostały zarejestrowane nawet przez stacje radiowe w odległości 1200 km od miejsca eksplozji. Uderzeniowa fala elektromagnetyczna wzbudziła duże prądy indukowane w antenach, kablach elektrycznych i elementach metalowych, niszcząc wszystkie, niezabezpieczone podzespoły elektroniczne. Jak się szacuje pojedynczy wybuch jądrowy o mocy 100 kT na wysokości 110 km może wygenerować niszczący HPM na powierzchni równoważnej połowie Stanów Zjednoczonych.

Wysokomocowe impulsy mikrofalowe generowane są również w urządzeniach takich jak wirkator lub generator Marksa. Energia wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych wzbudza bardzo silne prądy w obwodach elektronicznych powodując uszkodzenia elementów i układów elektronicznych zbudowanych na bazie półprzewodników ( tranzystorów, mikroprocesorów). Dla porównania detektor mikrofalowy ulega uszkodzeniu przy  $0,2 \mu\text{J}/\text{m}^2$  dla impulsu o długości 100 ns. Przykładowe urządzenie do generacji impulsów HPM, na bazie generatora Marksa przedstawiono na fot.1.



**Fot. 1.** Walizkowe urządzenie generujące impulsy HPEM (High Power Electromagnetics) typu DS-110 produkcji niemieckiej. Waga 23 kg, natężenie pola elektrycznego w impulsie  $E = 250 \text{ kV/m}$

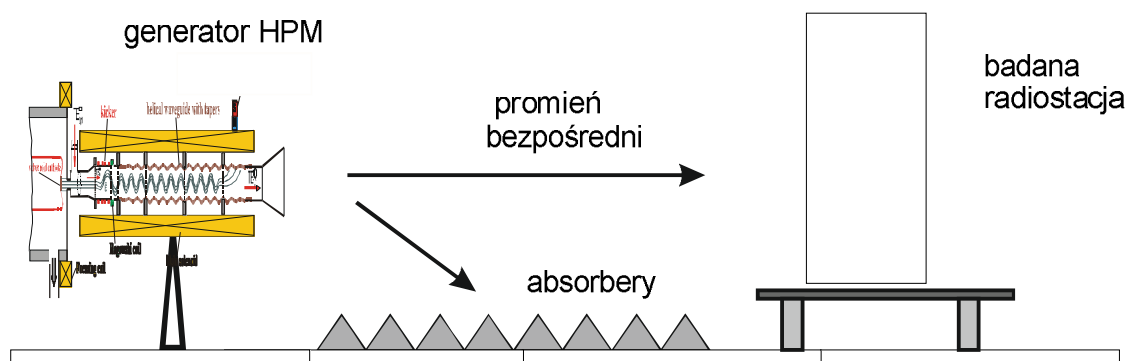
**Phot. 1.** Suitcase high-power HPEM (High Power Electromagnetics) source, type DS-110 of German manufacture. Weight 23 kg, the intensity of the pulsed electric fields  $E = 250 \text{ kV/m}$

Obecnie zachodzi konieczność opracowania skutecznych absorberów przeznaczonych do różnych zastosowań, jak na przykład: zabezpieczeń urządzeń elektronicznych w ramach kompatybilności elektromagnetycznej, do ochrony ludzi przed szkodliwym działaniem promieniowania, czy wreszcie do zabezpieczeń nentralgicznych urządzeń elektronicznych przed terrorystycznym atakiem z użyciem wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych.

### Poligonowe badania

Ważnym aspektem zastosowań absorberów są stacjonarne komory (tzw. komory bezodbiciowe) oraz komory przenośne do badań skutków oddziaływania impulsów HPM na elektronikę. W tych pomieszczeniach w celu zapewnienia tzw. warunków wolnej przestrzeni ściany, podłoga i sufit muszą być wyłożone absorberami do wytłumienia fali padającej. Warto wyjaśnić, że falą w wolnej przestrzeni jest fala biegnąca w linii w zasięgu wzroku. Przykładem jest bezpośrednie rozchodzenie się fal radiowych między antenami, widocznymi dla siebie. Dostępne handlowo absorbery charakteryzują się dużym ciężarem i znacznymi gabarytami objętościowymi. Potrzebą chwili jest opracowanie nowego skutecznego absorbera dla celów kompatybilności elektromagnetycznej, ale również do badań i zabezpieczeń przed impulsami HPM

W artykule opisano konkretny przypadek poszukiwania materiału kompozytowego jako absorbera do pomiarów na otwartych poligonach badawczych. Niektóre wersje generatorów wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych wykorzystują materiały wybuchowe do kompresji pola magnetycznego. W tym przypadku konstruowanie oraz badania generatorów nie mogą odbywać się w klasycznych bezodbiciowych komorach pomiarowych. Jedynym miejscem pozostaje otwarty teren badawczy. W celu zapewnienia warunków wolnej przestrzeni konieczna jest minimalizacja odbić od powierzchni ziemi wytworzonego promieniowania. W warunkach laboratoryjnych, tj. w bezodbiciowych komorach pomiarowych ściany oraz podłoga wyłożone są płytami ferrytowymi oraz stożkami grafitowymi. Ze względu na duży ciężar płyt ferrytowych oraz możliwość uszkodzenia delikatnych struktur grafitowych taki absorber raczej nie może być zastosowany na poligonie, w obszarze badań generatorów HPM. Zastosowanie absorbera położonego na ziemi pozwala na wytłumienie fali EM skierowanej w stronę ziemi, tym sposobem na badany obiekt pada jedynie promieniowanie bezpośrednie, co znacznie ułatwia korelacje skutków niszczącego działania impulsów HPM z poziomem padającego promieniowania – rys.1.



**Rys. 1.** Ideowy schemat poligonowych badań. Zastosowano absorber promieniowania mikrofalowego położony na ziemi. Umożliwił on eliminację promienia skierowanego w jego stronę

**Fig.1.** Schematic diagram of the test on the ground. Applied microwave radiation absorber located on the ground has allowed the elimination of the beam directed toward it.

### Tworzywa polimerowe

Materiały kompozytowe należą do materiałów przyszłościowych, wypierających, ze względu na często lepsze parametry techniczne materiały tradycyjne. Równoległy rozwój mechaniki, chemii, fizyki, technologii wytwarzania, matematyki, systemów i technologii komputerowych pozwala na projektowanie oraz wytwarzanie setek nowych materiałów o unikalnych właściwościach. Już obecnie obserwuje się powszechne stosowanie materiałów kompozytowych prawie we wszystkich dziedzinach nauki i techniki, m.in. w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym, aero- i astronautyce, biologii i inżynierii biomedycznej, energetyce jądrowej. Obserwacja trendów rozwojowych na świecie wskazuje na to, że technologie kompozytowe obok technologii informatycznych będą stymulować rozwój naszej cywilizacji.

Techniki radiacyjne dają unikatowe możliwości w zakresie projektowania i modyfikacji materiałów kompozytowych. Ogólnie mówiąc pozwalają w wygodny sposób indukować w materiałach wolne rodniki, które w przypadku polimerów mogą inicjować procesy tworzenia wiązań poprzecznych. W ten sposób jesteśmy w stanie w korzystny sposób zmieniać właściwości wielu materiałów polimerowych. Unikatowość technik radiacyjnych polega na tym, że procesy modyfikacji możemy prowadzić w zasadzie w dowolnej temperaturze. Mimo, że średnia ilość energii deponowana w napromienianych materiałach nie jest specjalnie wielka to jednak lokalnie odkładane są jej ilości porównywalne z wysokotemperaturowymi procesami chemicznymi. W praktyce możemy w obszarach tzw. gniazd jonizacji w temperaturze pokojowej uzyskać zjawiska, które w klasycznej technologii chemicznej przebiegają w ekstremalnych warunkach parametrów technologicznych. Zaletą obróbki radiacyjnej jest prosty sposób kontroli wielkości dawki pochłoniętej promieniowania.

W przypadku kompozytów barierowych dla promieniowania mikrofalowego zjawisko sieciowania polimeru po uformowaniu wyrobu można połączyć z korzystną modyfikacją ferromagnetyku. Inaczej mówiąc cząstki proszku szkła metalicznego dodatkowo umocowuje się w matrycy poprzez wiązania poprzeczne wytworzone w wyniku obróbki radiacyjnej. Proces można przeprowadzić za pomocą wiązki elektronów (EB) lub promieniowania gamma ( $\gamma$ ) i co istotne w dowolnej temperaturze (najczęściej temperaturze pokojowej).

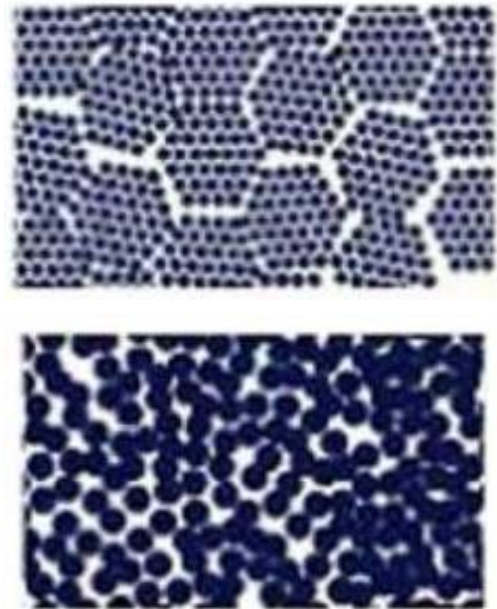
### Cel i wyniki badań

Celem badań było znalezienie nowego materiału absorpcyjnego, o następujących parametrach: mniejszej lub znacznie mniejszej wadze w porównaniu z typowymi ferrytami, elastyczności i możliwości rozwijania na powierzchni ziemi, wytrzymałości mechanicznej na naciski np. przejazd pojazdem mechanicznym.

Do badań, jako matryce kompozytu wytypowano Engage™ - elastomery poliolefinowe (POEs) typu etylen/okten lub etylen/buten [3]. Są one połączeniem materiałów polimerowych z elastomerami. Pozwalają na produkcję lżejszych, cieńszych olefiny termoplastyczne (TPO) o zwiększonej sztywności, wytrzymałości na uderzenia, lepszym dopasowaniu i wykończeniu oraz zmniejszonym czasie cyklu w stosunku do wiodących obecnie tworzyw polimerowych.

Założono, że materiały kompozytowe będą oparte o nową generację związków zawierających składniki ferromagnetyczne, które wykazują bardzo dobre własności

tłumienia dla promieniowania elektromagnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości. W celu uzyskania materiałów o niskim współczynniku odbicia i wysokim współczynniku pochłaniania energii promieniowania przeprowadzone zostały badania konstytutywnych parametrów miękkich materiałów magnetycznych (ferrytowych). Znane dotychczas materiały magnetyczne, w tym ferryty w zakresie mikrofalowym tracą swoje wysokie wartości przenikalności magnetycznej. Z tego powodu w zakresie częstotliwości powyżej 100 MHz materiały te nie znalazły zastosowania, jako absorbery. Do badań użyto nowy stop na bazie żelaza lub kobaltu. Pierwszym tego typu materiałem był proszek Finemet ( $\text{Fe}_{73}\text{Si}_{13}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ ) opracowany przez Yoshizawę z firmy Hitach. Został on otrzymany przez gwałtowne schładzanie w postaci taśmy o grubości 20  $\mu\text{m}$ . Natomiast później został wyżarzony do temperatury ok. 550°C w celu wywołania krystalizacji ziaren, które w takich warunkach osiągają wielkość 10 – 15 nm. Stopy nanokrystaliczne są rozwijane w celu otrzymania wysokiej przenikalności magnetycznej. Własności magnetyczne stopu Finemet uzależnione są od wielkości ziaren. Badany materiał otrzymano mechanicznie, a wielkości ziarna wynosiły mniej niż 10 nm.



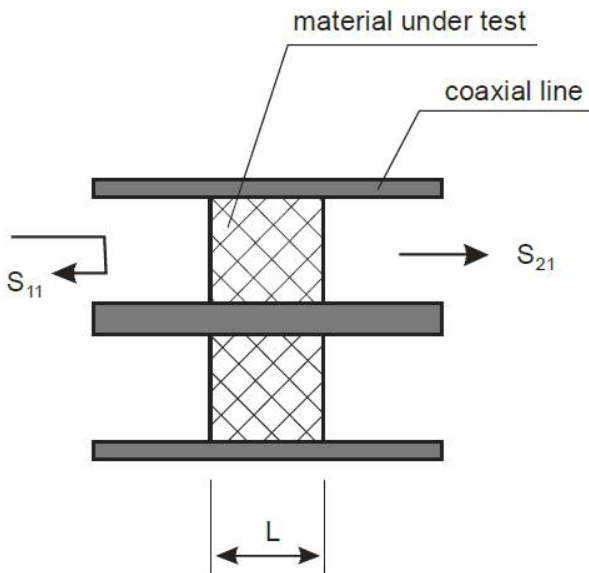
**Rys. 2.** Porównanie struktury krystalicznej (lewa fotografia) ze strukturą szkła metalicznego (struktura amorficzna - prawa fotografia)

**Fig. 2.** Comparison of the crystal structure (left photograph) with the structure of metallic glass (amorphous structure - right photo)

Zostały przeprowadzone pomiary, dla różnych składów wagowych szkła metalicznego i grafitu, tym nie mniej ze względu na najbardziej obiecujące wyniki końcowe, do dalszych badań wybrano materiał o następującym składzie wagowym: szkło metaliczne (79%) z domieszką grafitu (1%) oraz elastomer Engage 8200 (29%). Dodatkowo w celu poprawienia własności absorpcyjnych szkła metalicznego zostało ono radiacyjnie zmodyfikowane dawką 100 kGy w źródle promieniowania gamma (GC 5000) o mocy dawki 4,1 kGy/h. Pozwoliło to również na uzyskanie lepszego usieciowania elastomeru, co spowodowało wzmocnienie materiału [4]. Pomiary przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz.

### Pomiary przenikalności elektrycznej i magnetycznej szkła metalicznego domieszkowanego grafitem

W celu poznania własności absorpcyjnych i ekranujących substancji niezbędne jest zbadanie własności konstytutywnych tych materiałów tj. zespolonych przenikalności elektrycznych i magnetycznych. Pomiary te przeprowadzono za pomocą linii współosiowej. Pozwoliło to na uzyskanie szerokiego pasma częstotliwości [2, 3].



Rys. 3. Widok linii współosiowej do pomiarów stałych materiałów magnetycznych

Fig. 3. View of coaxial line to fixed measurement of magnetic materials

Próbki wykorzystane do pomiarów miały kształt toroidu. Ograniczeniem metody jest górny limit częstotliwości, które mogą wzbudzać wyższe rodzaje pola. Do kalibracji toru pomiarowego wymagane jest zastosowanie odpowiednich odcinków linii współosiowej. Mierzone próbki charakteryzuje się przy pomocy macierzy rozproszenia.

### Podsumowanie

Wykonano próby opracowania nowego typu kompozytowych materiałów elastomerowych służących do produkcji wyrobów chroniących przed działaniem promieniowania radiowego i mikrofalowego. Zbadano własności elektryczne kompozytu (Engage, szkło metaliczne, grafit) oraz wyznaczono jego skuteczności ekranowania.

Zastosowanie kompozytu elastomerowego powoduje, że materiał barierowy dla promieniowania mikrofalowego jest bardziej wytrzymały i zdecydowanie lżejszy niż standardowe płytki ferrytowe dostępne na rynku, do tego, szkło metaliczne wprowadza własności magnetyczne w częstotliwościach mikrofalowych, dzięki temu taki materiał powoduje zmniejszenie odbicia promieniowania i skuteczne pochłanianie energii promieniowania wewnątrz absorbera. Pomiarów przenikalności elektrycznej i magnetycznej dokonano w linii współosiowej przy zastosowaniu zmodyfikowanej metody pomiarowej. Badania wykonano przy częstotliwościach od 100 MHz do 10 GHz.

Najlepsze własności absorpcyjne kompozyt wykazuje przy częstotliwości 1 GHz, gdzie materiał nie wykazuje odbić pola elektromagnetycznego. Za pomocą obróbki radiacyjnej uzyskano korzystną modyfikację zarówno właściwości proszku ferrytowego jak i parametrów mechanicznych tworzywa polimerowego. Z przeprowadzonych pomiarów i otrzymanych wyników można wnioskować, że kompozyt jest obiecującym materiałem absorpcyjnym w zakresie mikrofal i będzie można wykorzystać go przy rozwiązywaniu problemów ze zdolnością danego urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do poprawnej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym (EMC, ang. ElectroMagnetic Compatibility) i w systemach antenowych. Opracowanie optymalnego kompozytu wymaga dalszych badań.

Zakres zastosowania ochronnych elastomerowych materiałów kompozytowych może być bardzo szeroki. Przykładowo do promieniowań elektromagnetycznych zaliczamy fale radiowe, mikrofałe, podczerwień, światło widzialne, ultrafiolet, promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma. Przy czym pierwsze z nich do długofalowego promieniowania ultrafioletowego nie powodują jonizacji i są przedmiotem zainteresowania fotochemii. Natomiast energia promieniowań począwszy od krótkofalowego promieniowania ultrafioletowego wystarcza do wybicia elektronów z atomów i cząsteczek, a oddziaływaniem ich z materią zajmuje się chemia radiacyjna. W praktyce na skalę przemysłową wykorzystuje się obecnie również wiązki elektronów przyspieszane w akceleratorach.

dr inż. Wojciech Głuszewski,  
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa

prof. dr hab. Roman Kubacki,  
Wojskowa Akademia Techniczna,  
Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,  
Warszawa

prof. dr hab. Maria Rajkiewicz,  
Instytut Inżynierii Materiałów Polimerowych i Barwników,  
Oddział Elastomerów i Technologii Gumi,  
Piastów

### Literatura

- [1] Kubacki R., Wnuk M., Ekstremalnie wysokomocowe impulsy broni elektromagnetycznej i ich oddziaływanie biofizyczne, rozdział w monografii pt.: Pokojowe i terrorystyczne zagrożenia radiacyjne, str. 247-257, wyd. WAT 2012.
- [2] Przesmycki, R., L. Nowosielski, M. Bugaj, K., Piwowarczyk, „Pomiar absorpcji materiałów pochłaniających fale elektromagnetyczne”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), No 2, 33-35, 2012.
- [3] Głuszewski W., Zagórski Z.P., Rajkiewicz M., Protective Effects in Radiation Modification of Elastomers, Radiat. Phys. Chem. 105, 53-56, 2014.
- [4] Głuszewski W., Zagórski Z.P., Rajkiewicz M., The Comparison of Radiation and a Peroxide Crosslinking of Elastomers. KGK und PV, 11/12, 46-49 (15), 2015.