

■ Dr inż. Wojciech Głuszewski,
Adiunkt, Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

■ Prof. dr hab. Roman Kubacki,
Wojskowa Akademia Techniczna

Polimerowe kompozyty w ochronie przed promieniowaniem mikrofalowym

Urządzenia i podzespoły elektroniczne, w których znajdują się układy scalone mogą ulec bezpowrotnemu zniszczeniu pod wpływem wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych - HPM. Generatory HPM są stosowane do działań wojskowych, terrorystycznych oraz przestępczych. Skutki przerwania pracy, uszkodzenia lub zniszczenia systemów elektrycznych, bądź elektronicznych są szczególnie niebezpieczne dla: transportu drogowego, kolejowego i lotniczego oraz energetyki i telekomunikacji. W artykule omówiono wybrane wyniki badań nad radiacyjną modyfikacją kompozytów polimerowych typu: elastomer Engage 8200, szkło metaliczne, grafit - skutecznych w ochronie przed działaniem promieniowań mikrofalowych i radiowych. Celem prac 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.

Wysokomocowe impulsy promieniowania mikrofalowego

Współczesne urządzenia radioelektroniczne są stosunkowo mało odporne na oddziaływanie napięć i prądów udarowych pochodzących od źródeł promieniowania elektromagnetycznego. Powstające przepięcia i przetężenia są przyczyną utraty sprawności podze-

spotów, a tym samym funkcjonalności danego przyrządu, bądź całego systemu. Największe zagrożenie stanowi impuls elektromagnetyczny, który można wytworzyć przy wykorzystaniu celowo zbudowanych generatorów mikrofal dużej mocy [1].

Wysokomocowe impulsy promieniowania mikrofalowego, nazywane również skrótowo HPM (z ang. *High Power Microwaves*) charakteryzują się bardzo

krótkim czasem trwania (rzędu nanosekund) i wielką mocą (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 radiowych. 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. Wytworzone wówczas promieniowanie gamma (γ) jonizuje powietrze nadając wybitym elektronom kierunek ruchu zbliżony do własnej orientacji rozprzestrzeniania się. Przyspieszane w ten sposób elektrony są źródłem promieniowania elektromagnetycznego. Impuls jest tak silny, że uwzględnia się go, jako jeden z czynników rażenia. Przy odpowiednim przeprowadzeniu wybuchu może on odgrywać pierwszoplanową rolę (NEMP - Nuclear Electromagnetic Pulse). W lipcu 1962 r. dokonano nad Oceanem Spokojnym na wysokości 400 km eksperymentalnej detonacji bomby termojądrowej (test Starfish Prime). Impuls elektromagnetyczny był znacznie większy niż się spodziewano. W efekcie nie dokonano dokładnych pomiarów, gdyż zabrakło skali na przyrządach. Impuls spowodował uszkodzenie urządzeń elektrycznych na Hawajach oddalonych od epicentrum eksplozji o ok. 1445 km. Ponadto promieniowanie uszkodziło kilka satelitów, w tym pierwszego prawdziwego satelitę komunikacyjnego Telstar 1 i pierwszego satelitę brytyjskiego Ariel 1. Warto dodać, że Telstar nie ucierpiał od pierwotnego impulsu elektromagnetycznego. Został bowiem wystrzelony dzień po teście „Starfish Prime”. Przyczyną był nowy, mocniejszy i trwalszy niż sądzili naukowcy sztuczny pas radioaktywny wokół Ziemi, który powstał, gdy ziemskie pole magnetyczne wychwyciło naładowane cząstki powstałe w wyniku wybuchu termojądrowego. „Pas Starfish” wykrywano jeszcze dziesięć lat po teście.

Wysokomocowe impulsy mikrofalowe generowane są również w urządzeniach takich jak wiraktor lub generator Marksa. Energia wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych wzbudza bardzo silne prądy w obwodach elektronicznych, powodując uszkodzenia elementów i układów 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 rys. 1.

Obecnie istnieje konieczność opracowania skutecznych absorberów przeznaczonych do różnych zastosowań, jak na przykład: zabezpieczeń urządzeń elektronicznych w ramach kompatybil-

ności elektromagnetycznej, do ochrony ludzi przed szkodliwym działaniem promieniowania, czy wreszcie do zabezpieczeń niewrażliwych urządzeń elektronicznych przed terrorystycznym lub przestępczym atakiem z użyciem wysokomocowych impulsów elektromagnetycznych [2].

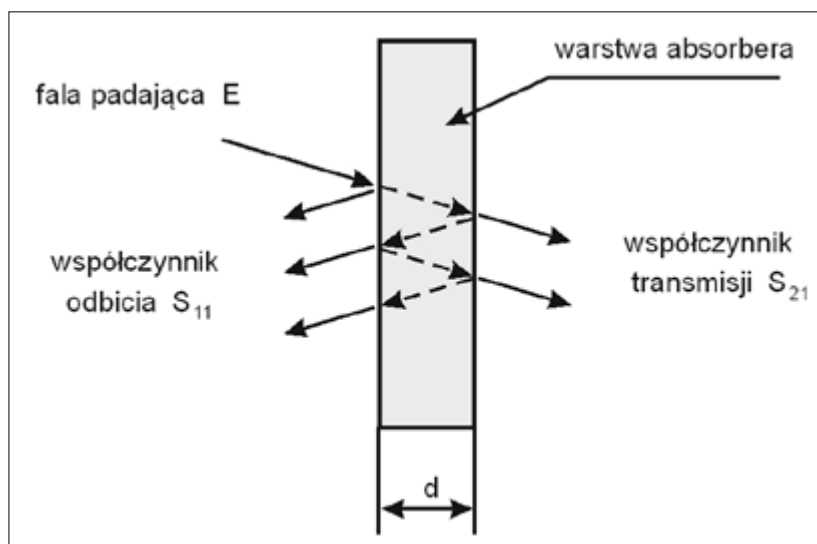


Rys. 1. Walizkowe urządzenie generujące impulsy HPEM (High Power Electromagnetics) typu DS-110 produkcji niemieckiej. Waga 23 kg, natężenie pola elektrycznego w impulsie $E = 250 \text{ kV}/\text{m}$

Skuteczność ekranowania

Wyróżnia się dwa mechanizmy ekranowania urządzeń ekspozowanych na promieniowanie elektromagnetyczne: absorpcja promieniowania wewnątrz materiału ekranującego (absorbera) oraz odbicie promieniowania od powierzchni materiału ekranującego.

Do ilościowego opisu fali przechodzącej przez warstwę absorbera wykorzystuje się model tzw. „wielokrotnych odbić”. Fala elektromagnetyczna przechodząc przez warstwę materiału doznaje wielokrotnych wewnętrznych odbić, kształtując promienie odbite oraz przechodzące. Promieniowanie przechodzące przez absorber jest tłumione. Schemat wielokrotnych odbić fali elektromagnetycznej w warstwie materiału przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Promienie odbite i przechodzące charakteryzowane są przez współczynniki macierzy rozproszenia (Sik), przy czym poziom promieniowania odbitego charakteryzowany jest przez współczynnik odbicia (S_{11}), natomiast promienie przechodzące charakteryzowane są przez współczynnik transmisji (S_{21})



Dobre materiały ekranujące powinny charakteryzować się wysokim poziomem pochłaniania energii padającej fali elektromagnetycznej w objętości czynnej absorbera. Trzeba również pamiętać, że fala elektromagnetyczna jest częściowo odbijana. W badaniach eksperymentalnych może powodować to uszkodzenia lub zakłócenia własnych urządzeń pomiarowych. W poszukiwaniu dobrego absorbera powinno się, więc przyjąć założenie ograniczenia poziomu promieniowania odbitego. Warunek ten jest szczególnie istotny, gdy falą padającą są wysokomocowe impulsy HPM.

Materiały wykorzystywane do ekranowania i pochłaniania można scharakteryzować ilościowo za pomocą parametru, jakim jest „skuteczność ekranowania

L” (ang. *Shielding Effectiveness*). Zależy on od wielu czynników, do których zaliczyć można: częstotliwość padającej fali elektromagnetycznej oraz kształt i objętość absorbera.

Tworzywa polimerowe

Techniki radiacyjne dają unikatowe możliwości w zakresie projektowania i modyfikacji materiałów kompozytowych. Pozwalają w wygodny sposób indukować w materiałach wolne rodniki, które w przypadku wielu polimerów inicjują procesy tworzenia wiązań poprzecznych. W ten sposób jesteśmy w stanie w korzystny sposób zmieniać właściwości materiałów polimerowych. Prowadzone w dowolnej temperaturze procesy radiacyjnej modyfikacji łatwo

kontrolować wielkością dawki pochłoniętej promieniowania [3].

W przypadku kompozytów barierowych dla promieniowań mikrofalowych zjawisko sieciowania polimeru po uformowaniu wyrobu można połączyć z korzystną modyfikacją ferromagnetyku [4]. Inaczej mówiąc, cząstki proszku szkła metalicznego dodatkowo umocowuje się w matrycy poprzez wiązania poprzeczne wytworzone w wyniku obróbki radiacyjnej. Procesy napromieniowania przeprowadzi się za pomocą wiązki elektronów (EB), promieniowania gamma (γ) lub promieniowania hamowania.

Do badań, jako matryce kompozytu wytypowano polimery o nazwie handlowej Engage™ (elastomery poliolefinowe (POEs) typu etylen/okten lub etylen/buten). Stanowią one w istocie połączenie



Rys. 3. Komora do napromieniowania w źródle promieniowania gamma GC 5000 w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej

materiałów polimerowych z elastomerami. Pozwalają na produkcję lżejszych, cieńszych olefin termoplastycznych (TPO) o zwiększonej sztywności, wytrzymałości na uderzenia, lepszym dopasowaniu i wykończeniu oraz zmniejszonym czasie cyklu w stosunku do wiodących obecnie tworzyw polimerowych [5].

Radiacyjne sieciowanie Engage jest interesującym przykładem modyfikacji polimerów za pomocą promieniowania jonizującego. Znaczenie praktyczne może mieć połączenie tradycyjnego sieciowania (z wykorzystaniem nadtlenu) z sieciowaniem radiacyjnym, jak również proces odwrotny: nadtlenującej wulkanizacji poprzedzony radiacyjną modyfikacją. Jednym z celów pracy było opisanie obu sposobów sieciowania na właściwości mechaniczne elastomerów [tab. 1]. W szczególności zwrócono uwagę na wpływ efektów ochronnych aromatycznych dodatków do elastomeru (nadtlenuki, termo i fotostabilizatory) na zjawiska sieciowania i postradiacyjnego utleniania [6]. Aromatyczne nadtlenuki częściowo ulegają modyfikacji w procesie wstępnego napromieniowania, co ma wpływ na późniejszy proces wulkanizacji. Wpły-

wają one również na zjawiska radiacyjne sieciowania polimeru. W badaniach w oryginalny sposób zastosowano metodę chromatografii gazowej [7]. Za jej pomocą określano wydajności radiacyjne wydzielania wodoru i wydajności pochłaniania tlenu przez tworzywo. Polimer Engage 8200 badano w formach: granulatu, folii, folii z dodatkiem nadtlenu, folii z dwukrotnie większą ilością nadtlenu, wulkanizowanej folii oraz dwóch wulkanizowanych folii z dodatkami nadtlenu. Wykazano, że w zakresie od 20 do 300 kGy stopień usieciowania jest propor-

wydzielania wodoru. W ten sposób potwierdzono, że obróbka radiacyjna jest wygodnym narzędziem kontroli stopnia usieciowania elastomeru.

Badania własności absorpcyjnych szkła metalicznego domieszkowanego grafitem

Założono, że materiały kompozytowe będą oparte o nową generację związków zawierających składniki ferroma-



Obecnie istnieje 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 newralgicznych urządzeń elektronicznych (...)

jonalny do wielkości dawki pochłoniętej promieniowania. Udowodniono, że stopień sieciowania elastomerów jest proporcjonalny do wydajności radiacyjnego

gnetyczne, które wykazują bardzo dobre własności tłumienia dla promieniowania elektromagnetycznego w szerokim zakresie częstotliwości. W celu uzyska-

Engage 8200, wulkanizacja + napromieniowanie								
	WR1				WR2			
	0 kGy	10 kGy	20 kGy	50 kGy	0 kGy	10 kGy	20 kGy	50 kGy
Wytrzymałość MPa	8,1	9,8	7,4	6,2	5,1	6,8	6,7	6,5
Wydłużenie przy zerwaniu %	690	675	627	559	477	458	476	470
Moduł 100% MPa	2	2,3	2,2	2,3	2,2	2,4	2,4	2,4
Moduł 200% MPa	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	3,1	3,1	3,0
Moduł 300% MPa	3,1	3,3	3,2	3,3	3,4	3,8	3,7	3,7
Twardość Shore'a A, °ShA	69	67	69	68	70	70	69	70

Engage 8200, napromieniowanie + wulkanizacja							
	RW1			RW2			
	0 kGy	10 kGy	20 kGy	0 kGy	10 kGy	20 kGy	
Wytrzymałość MPa	8,1	11,7	11,6	5,1	7,2	6,1	
Wydłużenie przy zerwaniu %	690	746	751	477	517	532	
Moduł 100% MPa	2	2,2	2,2	2,2	2,4	2,3	
Moduł 200% MPa	2,7	2,8	2,7	2,8	3,0	2,9	
Moduł 300% MPa	3,1	3,2	3,2	3,4	3,6	3,5	
Twardość Shore'a A, °ShA	69	68	68	70	67	70	

Tab. 1. Oznaczenia: WR1 - wulkanizacja i napromieniowanie folii z nadtlenukiem, WR2 - podwójna ilość nadtlenu, RW1 - napromieniowanie i wulkanizacja folii z nadtlenukiem, RW2 - podwójna ilość nadtlenu. Wielkości dawek pochłoniętych podano w kGy (kJ/kg)



nia materiałów o niskim współczynniku odbicia i wysokim współczynniku pochłaniania energii promieniowania, przeprowadzone zostały badania konstytutywnych parametrów miękkich materiałów magnetycznych (ferytowych). 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

cyjnie zmodyfikowane dawką 100 kGy w źródle promieniowania gamma (GC 5000) o mocy dawki 4,1 kGy/h. Pozwoliło to również na uzyskanie lepszego usieciwienia elastomeru, co spowodowało wzmocnienie materiału. Pomiar skuteczności ekranowania przeprowadzono w zakresie częstotliwości od 100 MHz do 10 GHz.

Podsumowanie

Wykonano próby wykorzystania elastomeru Engage do opracowania nowego typu modyfikowanych radiacyjnie

metaliczne wprowadza własności magnetyczne w częstotliwościach mikrofalowych. Dzięki takiemu rozwiązaniu materiał powoduje zmniejszenie odbicia promieniowania i skutecznie pochłania energię promieniowania wewnątrz absorbera. Za pomocą obróbki radiacyjnej uzyskano korzystną modyfikację zarówno właściwości proszku ferrytowego, jak i parametrów mechanicznych tworzywa polimerowego. Z analizy wyników przeprowadzonych pomiarów można wnioskować, że kompozyt jest obiecującym materiałem absorpcyjnym w zakresie mikrofal. Po dokładnych badaniach technologicznych można go w przyszłości wykorzystać 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.

Warto na koniec dodać, że radiacyjna modyfikacja polimerów może zostać wykorzystana w wielu innych dziedzinach, np. do poprawy pożarowego bezpieczeństwa izolacji kabli i przewodów elektrycznych, produkcji uszczelnień i opon samochodowych oraz usieciowania kompozytów polimerowych dla specjalnych zastosowań [8]. Tematy te są omawiane na Szkołach Radiacyjnej Modyfikacji Polimerów, które co dwa lata organizuje Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w Warszawie. Najbliższy kurs odbędzie się w październiku 2022 r. □

” **Wyróżnia się dwa mechanizmy ekranowania urządzeń eksponowanych na promieniowanie elektromagnetyczne: absorpcja promieniowania wewnątrz materiału ekranującego (absorbera) oraz odbicie promieniowania od powierzchni materiału ekranującego**

materiałem był proszek Finemet (Fe-73,5Si13,5B9Nb3Cu1) opracowany przez Yoshizawę z firmy Hitachi. 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 radia-

kompozytowych materiałów elastomerycznych służących do produkcji wyrobów chroniących przed działaniem promieniowania mikrofalowego. Zbadano własności mechaniczne i elektryczne kompozytu zawierającego elastomer, szkło metaliczne i grafit oraz wyznaczono jego skuteczności ekranowania.

Zastosowanie kompozytu elastomerycznego powoduje, że materiał barierowy dla promieniowania mikrofalowego jest bardziej wytrzymały i zdecydowanie lżejszy niż standardowe płytki ferrytowe dostępne na rynku. Do tego szkło

Literatura:

1. R. Kubacki, W. Głuszewski, D. Laskowski, K. Rudyk, M. Kuchta; EMC microwave absorber for outdoor applications, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, Vol. 10, 7, 754-758.
2. W. Głuszewski, R. Kubacki, M. Rajkiewicz; Modyfikowane radiacyjnie materiały w ochronie przed promieniowaniem mikrofalowym, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna, Biuletyn Informacyjny Państwowej Agencji Atomistyki*, 2017, 107, 1, 21-25.
3. W. Głuszewski, Z.P. Zagórski, M. Rajkiewicz; The Comparison of Radiation and a Peroxide Crosslinking of Elastomers. *KGK und PV*, 2015, 11/12, 46-49.
4. R. Mroczynski, M. Szymańska, W. Głuszewski; Reactive magnetron sputtered hafnium oxide layers for nonvolatile semiconductor memory devices, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2015, 1-5.
5. W. Głuszewski; Zastosowania radiolizy polimerów w energetyce, *Nowa Energia*, 2022, 1, 49-51.
6. W. Głuszewski; Efekty ochronne w radiolizie naturalnych i syntetycznych polimerów, *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 2022, 1, 123, 22-26.
7. W. Głuszewski; GC investigation of post irradiation oxidation phenomena on polypropylene, *Nukleonika*, 2021, 66 (4), 187-92.
8. H. Engelmann, W. Głuszewski, Kompozyty polimer-metal w ochronie radiologicznej, *Tworzywa Sztuczne w Przemysle*, 2016, 4, 56-57.

