PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

OPEN ACCESS

Wojciech PRZYBYŁ[1], Ireneusz PLEBANKIEWICZ[2], Krzysztof A. BOGDANOWICZ[3], Agnieszka IWAN[4]

ORCID: [1]0000-0002-0384-3463, [2]0000-0002-0077-5215, [3]0000-0001-8526-626X, [4]0000-0002-7705-6577

DOI: 10.15199/48.2025.11.20

Rodzaj materiału a właściwości maskujące w zakresie mikrofalowym

Material type and masking properties in the microwave range

[1] mgr inż. Wojciech Przybył, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50−961 Wrocław, e-mail: przybyl@witi.wroc.pl

[2] mgr inż. Ireneusz Plebankiewicz, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50−961 Wrocław, e-mail: plebankiewicz@witi.wroc.pl

[3] dr Krzysztof A. Bogdanowicz, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50−961 Wrocław, e-mail: bogdanowicz@witi.wroc.pl

[4] prof. dr hab. Agnieszka Iwan, Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej im. profesora Józefa Kosackiego, ul. Obornicka 136, 50−961 Wrocław, e-mail: iwan@witi.wroc.pl

Adres do korespondencji: przybyl@witi.wroc.pl

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono przegląd współczesnych materiałów pochłaniających promieniowanie radarowe (RAM) o wysokiej zdolności pochłaniania fal elektromagnetycznych, w tym omówiono mechanizmy ich działania i główne klasy materiałów. W części badawczej zamieszczono wyniki badań filamentu na bazie polilaktydu zawierającego miedź, jako absorbera fal elekromagnetycznych oraz ekranu elektromagnetycznego jako materiał konstrukcyjny i zarazem tłumiący do wytwarzania obudów w technologii przyrostowej urządzeń elektronicznych, takich jak ładowarka lub zapalarka.

Słowa kluczowe: ochrona radiolokacyjna, radar, skuteczna powierzchnia odbicia, obniżona wykrywalność, materiały pochłaniające promieniowanie radarowe

Abstract: This paper reviews high-performance radar-absorbing materials (RAM), focusing on their absorption mechanisms (dielectric and magnetic losses, impedance matching) and key types, including carbon composites, ferrites, conductive polymers, and metamaterials. Their advantages and limitations are analyzed. The study also examines the electromagnetic absorption and shielding properties of PLA filament with copper, assessing its potential for additive manufacturing of electronic device enclosures.

Keywords: radiolocation protection, radar, Radar Cross-Section, stealth, Radar-Absorbing Materials

Wstęp

Współczesne konflikty zbrojne, a w szczególności nowoczesne systemy rozpoznania sprawiają, że technologie obniżające wykrycie (*stealth*) nabierają szczególnego znaczenia strategicznego. Decydującym czynnikiem jest tzw. skuteczna powierzchnia odbicia (*Radar Cross-Section,* RCS). Wpływ na nią mają rozmiar obiektu, kształt oraz zastosowanie powłok pochłaniających promieniowanie radarowe (RAM) [1]. O ile kształt odpowiada za rozpraszanie, to materiały RAM za absorpcję promieniowania elektromagnetycznego. Obniżenie RCS sprzyja zmniejszeniu echa radarowego, a zatem ukryciu obiektu przed rozpoznaniem radarowym.

Właściwości fizyczne materiałów RAM

Interakcja fal elektromagnetycznych z materiałem jest uzależniona od właściwości elektrycznych (przenikalność elektryczna) i magnetycznych (przenikalność magnetyczna) materiału. Idealny materiał, to taki, który maksymalizuje pochłanianie fali wewnątrz i jednocześnie minimalizuje fale odbite oraz przenikające. Zatem niezbędnym staje się dopasowanie impedancji wejściowej warstwy RAM i wolnej przestrzeni [2], co opisuje wzór (1).

$$Z_{\text{in}} = Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left[j\left(\frac{2\pi f d}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\right)\right] \tag{1}$$

gdzie: Z_{in} – impedancja wejściowa, $Z_0 \approx 377\ \Omega$ – impedancja wolnej przestrzeni, μ_r – stała magnetyczna, ε_r – stała dielektryczna, d – grubość materiału, f – częstotliwość, c – prędkość światła.

Zatem warunek dopasowania impedancji przyjmuje postać przedstawioną we wzorze (2).

$$Z_{in}/Z_0| \approx 1 \tag{2}$$

a współczynnik tłumienia RL można określić równaniem (3).

$$\mathrm{RL} = 20\log_{10}\left|\frac{Z_{in}-Z_0}{Z_{in}+Z_0}\right| \tag{3}$$

W praktyce efekt taki można uzyskać poprzez dobór kombinacji materiałów np. mieszając wypełniacz magnetyczny z dielektrykiem. Takie układy charakteryzują się dobrymi właściwościami absorpcyjnymi dla określonych zakresów częstotliwości, a zatem, aby poszerzyć zakres działania stosuje się struktury warstwowe lub taki dobór kompozycji, aby zapewnić gradientowe zmiany impedancji.

Obniżenie echa radarowego można także uzyskać poprzez zastosowanie np. pasmowych ekranów interferencyjnych. Jednak ze względu na specyficzne wymogi konstrukcyjne i ścisłe związanie z długością pochłanianej fali ograniczają ich stosowanie [3].

Rodzaje współczesnych materiałów RAM

Współcześnie do najważniejszych materiałów RAM zalicza się:

- Przewodzące materiały węglowe i ich kompozyty: sadza, węgiel aktywowany, włókna węglowe, nanorurki, grafit, grafen [4]. Ich działanie wynika głównie ze strat dielektrycznych (wysoka przewodność elektryczna i duża powierzchnia właściwa umożliwiają efektywne tłumienie fal poprzez prądy wirowe i polaryzację ładunków, dzięki temu uzyskują duże stopnie tłumienia. Jednak z powodu braku strat magnetycznych cechują się bardzo wąskim pasmem działania. Materiały te są lekkie i często chemicznie odporne.
- Materiały ferrytowe: żelazo karbonylkowe, tlenki żelaza, proszki węglanowe, Ni–Zn. Ich działanie to główne straty magnetyczne dzięki domenom magnetycznym [5,6] oraz w niewielkim stopniu dielektryczne, co czyni je skutecznymi ale dla wąskich pasm częstotliwości. Charakteryzują się stosunkowo dużą gęstością oraz trwałością termiczną.
- Polimery przewodzące: polianilina (PANI), polipirol (PPy), poliacetylen (PA), politiofen (PT, PEDOT). Pełnią rolę głównie absorberów dielektrycznych (straty poprzez przewodnictwo elektronowe i polaryzację łańcuchów polimerowych), co także wpływa na ich wąsko pasmowość działania tłumiącego. Przy ich użyciu można wytwarzać lekkie i elastyczne powłoki nie ulegające korozji.
- Kompozyty polimerów przewodzących. Łącząc polimery przewodzące z innymi materiałami można uzyskać większe wartości lub szersze pasma tłumienia, a to dzięki wieloskalowym mechanizmom przewodzenia i polaryzacji. Natomiast stabilność termiczna i własności mechaniczne kompozytów mogą ograniczać zastosowania [7].
- Metamateriały absorbujące: wielowarstwowe struktury złożone z metalicznych wzorów (np. pasma, pierścienie) naniesione na dielektryki, a umieszczonych na metalowym podłożu. Cechują się bardzo dużą absorpcją przy bardzo małej grubości, lecz dla bardzo wąskiego pasma [8]. Natomiast poprzez zastosowanie wielu warstw komórek takich rezonatorów można uzyskać szerokie pasma absorpcji, a użycia elementów aktywnych umożliwia np. ich strojenie do wybranych częstotliwość. Niemniej wykonanie dużych powierzchni takich struktur bywa skomplikowane i kosztowne, a skuteczność tłumienia wyraźnie obniża się poza zaprojektowaną częstotliwość oraz dla dużych kątów padania fali.

Zastosowanie Materiałów RAM

Rozpoznanie radarowe prowadzi się we wszystkich domenach pola walki – na lądzie, w powietrzu, na morzu, stąd i materiały RAM znajdują tam zastosowanie. Natomiast ze względu na specyfikę każdej domeny pewne materiały są lepiej predysponowane do korzystania w danym środowisku. W lotnictwie, gdzie występują gwałtowne i w dużym zakresie zmiany temperatury oraz duże przeciążenia, zatem wykorzystuje się kompozyty ceramiczne z dodatkiem węgla. W marynarce wojennej materiały RAM narażone są na słoną wodę, promieniowanie UV i zmiany temperatury i tu znajdują zastosowanie gumowane lub elastomerowe arkusze z wbudowanymi absorberami ferrytowymi. Na lądzie wykorzystywane są dwa podejścia – farby maskujące np. poliuretanowe zawierające absorbery oparte na ferrytach lub, na czas postoju, pokrycia maskujące w formie wielozakresowych siatek zawierających absorbery różnego typu (ferrytowe, węglowe, polimerowe czy kompozyty). Kompromisowym rozwiązaniem na czas ruchu i postoju są tzw. wielozakresowe maskowania mobilne, które mogą mieć formę paneli, a stosowane są technologie zbliżone do pokryć maskujących.

Zatem oprócz dobrych właściwości absorpcyjnych materiałów RAM, krytycznym staje się odporność środowiskowa. Materiały pomimo oddziaływania takich czynników jak deszcz, wilgoć, skrajne temperatury, promieniowanie słoneczne – zwłaszcza UV, sól morska, erozja aero- i hydrodynamiczna, pyły, uderzenia np. gałęzi, odłamków, pocisków, powinny zachowywać swoje parametry i nie powinny wpływać na warunki użytkowe, aero- i hydrodynamiczne, zwiększać sygnatury termicznej, zwiększać zbytnio masy, osłabiać konstrukcji, czy ograniczać możliwości telekomunikacyjnych urządzeń pokładowych. Pewnym rozwiązaniem jest integrowanie elementów pochłaniających w strukturę konstrukcyjną, gdzie jako kompozyty mogą pełnić rolę zarówno mechaniczną, jak i elektromagnetyczną.

Aktualne badania, innowacje, kierunki rozwoju

Obecnie następuje intensywny rozwój nowych materiałów RAM, gdzie prym wiodą nanomateriały i hybrydowe nanokompozyty. Przykładem są nanorurki węglowe i grafen (ogromny stosunek powierzchni do masy), wkomponowane w matryce polimerowe lub włókna, które uzyskują bardzo dobre tłumienie, a dzięki gradientowi zawartości absorbera – szerokie pasmo tłumienia.

Drugim istotnym elementem są metody wytwarzania. Tu z kolei obserwuje się wykorzystanie druku przyrostowego (druk 3D) do tworzenia struktur pochłaniających. Techniki addytywne umożliwiają wytwarzanie elementów o skomplikowanych kształtach, w tym porowatych oraz gradientowych strukturach.

Pomimo stałych badań, uzyskanie skutecznego tłumienia dla szerokiego zakresu promieniowania oraz zapewnienie dobrych właściwości mechanicznych jest w dalszym ciągu dużym wyzwaniem, gdyż klasyczne rozwiązania są wąsko pasmowe, a zapewnienie szeroko pasmowości wiąże się ze zwiększeniem grubości warstw RAM. Dodatkowym utrudnieniem jest np. przenikanie fal o częstotliwościach metrowych przez stosunkowo cienkie powłoki. Z kolei rozwiązania z udziałem np. farb ferrytowych cechują się dużą masą, co ma wpływ na parametry eksploatacyjne obiektów. Stąd perspektywicznymi kierunkami wydają się łączenie różnych mechanizmów w jednym materiale (hybrydy wieloskładnikowe) lub aktywne dostrajanie charakterystyk absorpcji.

Warto także zwrócić uwagę na koszty wytwarzania oraz utrzymania materiałów RAM w konstrukcjach obiektów wojskowych. Idealny materiał *stealth* mógłby jednocześnie pełnić rolę także powłoki antykorozyjnej, termoizolacyjnej (maskowania termalnego), maskowania w zakresie optycznym (charakterystyki spektralne zgodne z tłem), czy struktury nośnej, co w przypadku pojawienia się radarów wielo częstotliwościowych, czy multispektralnych głowic obserwacyjnych wydaje się rozwiązaniem optymalnym.

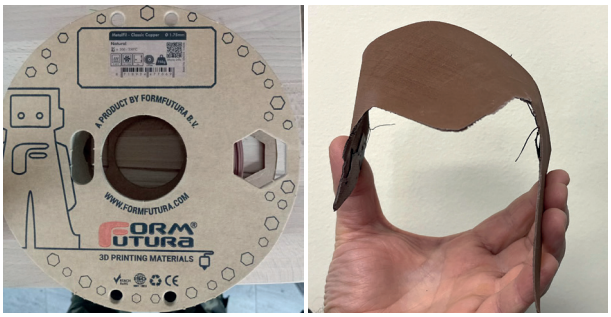
Aktualne, gdy znane są mechanizmy absorpcji elektromagnetycznej, prace badawczo-rozwojowe skupiają się na udoskonalaniu parametrów materiałów RAM oraz przezwyciężeniu głównych ograniczeń – zwiększenie stopnia tłumienia, poszerzenia zakresu częstotliwości działania pochłaniającego (także na zakres podczerwony), zmniejszenie masy przy jednoczesnym zmniejszeniu grubości warstw, polepszenie właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych, obniżenie kosztów, czy wprowadzania dogodniejszych technik wytwarzania.

Materiały RAM, jako element skutecznego zmniejszenia wykrycia ma charakter strategiczny, zwłaszcza w czasie szybko zmieniających się możliwości sensorycznych na współczesnym polu walki. Zatem stałe badania nad tą technologią umożliwiają stworzenie kolejnych generacji materiałów RAM, spełniających wymagania przyszłego pola walki i mogących poprawiać ochronę siły żywej i sprzętu wojskowego.

Filament PLA z domieszką miedzi

W Wojskowym Instytucie Techniki Inżynieryjnej są prowadzone prace nad materiałami RAM i jednocześnie układami zasilającymi wyposażonymi w panele fotowoltaiczne i magazyny energii (np. ładowarki słoneczne podwójnego zastosowania, czy zapalarki do inicjowania wybuchów). W ramach badań ochrony elektromagnetycznej zbadano właściwości absorpcyjne różnych paneli fotowoltaicznych [9]. Obudowy do ładowarek i zapalarek wykonywano metodą przyrostową w technologii druku 3D z wykorzystaniem biodegradowalnych filamentów na bazie polilaktydu (PLA). Wykonano także próby z użyciem filamentu PLA z dużą zawartością czynnika metalicznego – miedzi, w kontekście ochrony elektromagnetycznej i przeciw radiolokacyjnej w pasmie 4-18 GHz. Do badań użyto filamentu MetalFil – Clasic Copper 1.75 mm o zawartości sproszkowanej miedzi 80%, produkcji FormFutura B.V. (rys. 1A)

Miedź, pomimo, że jest bardzo dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego nie spełnia wymagań stawianych materiałom RAM: nie jest ferromagnetykiem i nie cechuje się dużymi stratami dielektrycznymi.



(A) (B)

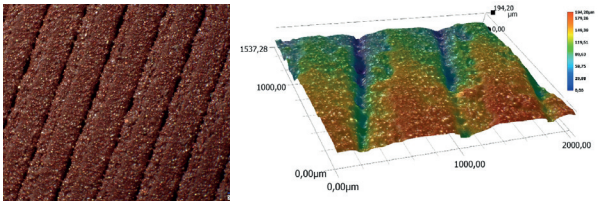
Rys. 1. Szpula filamentu (A) oraz wykonana próbka (B)

Sprawdzono także, czy filament z domieszką miedzi może pełnić rolę klatki Faradaya lub ekranu elektromagnetycznego (EMC).

Wyniki badań

Badania rozpoczęto od wykonania metodą druku 3D próbki o wymiarach 20×20×1 mm. Jednak wydrukowana próbka o grubości 1 mm okazała się bardzo elastyczna, co dyskwalifikowało ją jako materiał na obudowy o stosunkowo cienkich ściankach (ok. 1 mm) (rys. 1B).

W celu oceny morfologii powierzchni dokonano obserwacji pod cyfrowym mikroskopem optycznym Keyence VHX-S750E (rys. 2A) oraz zmierzono poziom nierówności (rys. 2B). Powierzchnia przybrała formę równomiernych pasów o szerokości ok. 0,8 mm, co wynika z użytej głowicy drukującej i zagłębień ok. 0,2 mm spowodowanych zastosowaną technologią i ustawieniami procesu druku (prędkość, rodzaj filamentu, temperatury pracy).

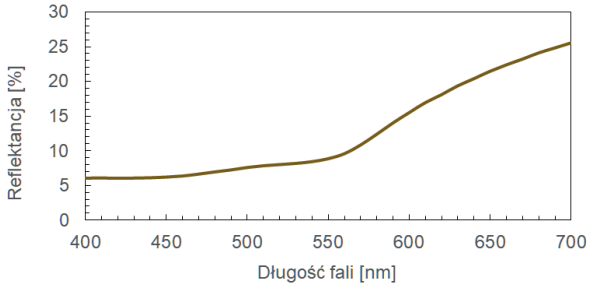


(A) (B)

Rys. 2. Powierzchnia próbki obserwowana pod mikroskopem optycznym (A), wizualizacja zmian powierzchni próbki (B)

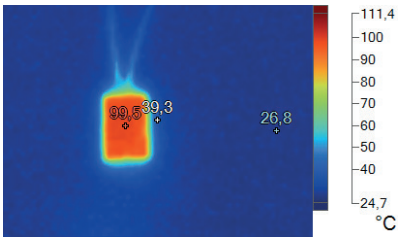
Mając na uwadze ogólne właściwości maskujące dokonano także pomiarów reflektancji oraz przenikalności cieplnej. W celu określenia charakterystyk spektralnych w zakresie od 400 do 700 nm oraz wyznaczenia współrzędnych barwy CIE L*a*b* użyto spektrofotometru MiniScan EZ. (rys. 3).

Reflektancja w zakresie od 400 nm do 70 nm nie odbiega od charakterystyk spotykanych w naturze – wyschnięte liście drzew, czy suche trawy. Podobnie kolor o współrzędnych L = 39, a = 14, b = 15 nie jest kolorem obcym dla naturalnego środowiska.



Rys. 3. Charakterystyka spektralna próbki

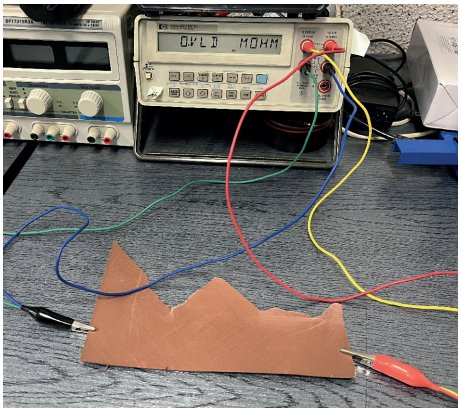
Do określenia przewodności cieplnej użyto kamery termalnej Flir oraz elementu grzejnego. Element grzejny ustawiono na temperaturę 100°C, a następnie po przyłożeniu próbki, za pomocą kamery rejestrowano w interwałach czasowych (co 30 s) temperaturę na powierzchni próbki (rys. 4).



Rys. 4. Termogram z pomiarów temperatury powierzchni płytki

Próbka bardzo szybko się nagrzewała i po krótkim czasie (60 s) osiągała temperaturę zbliżoną do temperatury elementu grzejnego 99,5°C. Duża zawartość miedzi (ok. 80%) w filamencie znajduje potwierdzenie w dużej przewodności próbki.

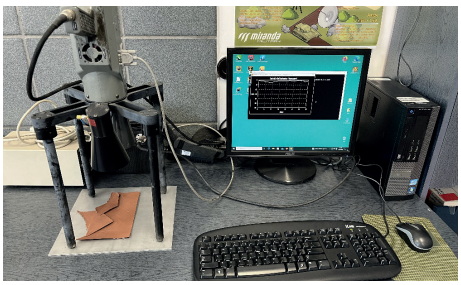
Kluczowym parametrem z punktu widzenia ochrony przeciwradiolokacyjnej i właściwości ekranujących EMC było stwierdzenie występowania (lub nie) ciągłości siatki przewodzącej prąd elektryczny przez zawarty w filamencie proszek miedzi. W tym celu dokonano pomiarów rezystancji próbki (rys. 5).



Rys. 5. Pomiar rezystancji próbki

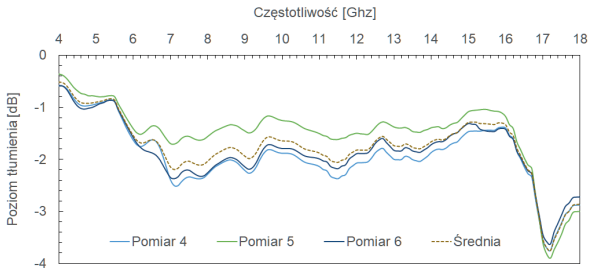
Pomiary rezystancji (0 Ω) potwierdziły brak przewodnictwa elektrycznego dla filamentu domieszkowanego miedzią nawet w 80%.

Główne pomiary obejmowały sprawdzenie poziomu echa radarowego. Badania wykonano przy użyciu reflektometru PR-17CXKu (rys. 6) w zakresie od 4 do 18 GHz z krokiem co 100 MHz.



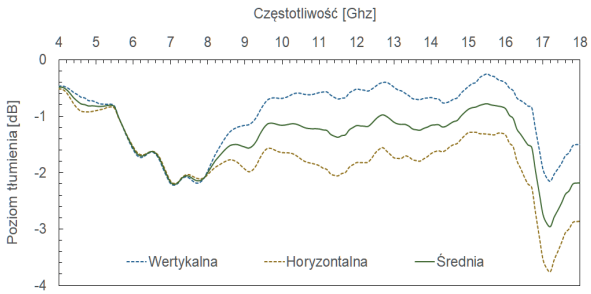
Rys. 6. Stanowisko do badań poziomu odbicia/tłumienności w trakcie pomiarów próbki

Pomiary wykonano 3 krotnie dla każdego ułożenia (poprzecznie i podłużnie) względem ułożenia anten przyrządu, aby sprawdzić izotropie materiału. Wyniki pomiarów i średnie przedstawiono na rysunkach 7 oraz 8.



Rys. 7. Wizualizacja pomiarów (i średniej) tłumienia echa radarowego dla próbki w ułożeniu horyzontalnym w stosunku do wzorcowej płyty aluminiowej

Poziom tłumienia próbki dla ułożenia horyzontalnego zmieniał się w zależności od zakresu częstotliwości, i tak dla zakresu od 4 do ok. 7 GHz nastąpił wzrost tłumienia z poziomu ok. 0,5 dB do ok 2 dB. Dla zakresu od 7 do 16 GHz następowało niewielkie osłabienie tłumienia – od 2 dB do 1,35 dB. Następnie zanotowano wyraźne zwiększenie tłumienia aż do maksimum na poziomie ok. 3,76 dB dla częstotliwości 17,2 GHz. Od poziomu 17,2 GHz do końca obserwowanego zakresu – 18 GHz występowało zmniejszenie tłumienia do poziomu ok. 2,86 dB.



Rys. 8. Wizualizacja średnich z pomiarów tłumienności próbek dla ułożenia horyzontalnego (H) oraz wertykalnego (V)

Próbka w ułożeniu wertykalnym charakteryzowała się podobnym przebiegiem poziomów tłumienia w poszczególnych podzakresach pomiarowych, jednak od ok. 8 GHz do ok. 16 GHz nastąpił większy spadek tłumienia, bo do wartości ok 0,4 dB, a maksimum tłumienia, również zlokalizowane dla częstotliwości 17,2, osiągnęło tylko 2,15 dB, by dla 18 GHz osiągnąć 1,5 dB.

Wyniki pomiarów potwierdzają pewną anizotropowość próbki w zakresie tłumienia fali elektromagnetycznej, a wynikającą z pasmowej struktury próbki na skutek sposobu jej wytworzenia (filamentowy druk 3D).

Wnioski

- Samo przewodnictwo, i to w sytuacji, gdzie nie tworzy ciągłej metalicznej sieci, nie wystarcza, aby pochłaniać energię, a skutkuje raczej odbiciem.
- Proszek miedzi (impedancja Cu bliska zeru) w polimerze nie daje korzystnego dopasowania impedancji wejściowej z impedancją wolnej przestrzeni, co uniemożliwia skuteczne wniknięcie fali w głąb materiału.
- Pomimo udziału proszku miedzi w filamencie, jego gęstość i rozmieszczenie nie zapewniają wytworzenia odpowiedniej polaryzacji międzyfazowej.
- Miedź, jako nieferromagnetyk nie umożliwia zaistnienie rezonansu magnetycznego, czy histerezy magnetycznej, co jest niezbędnym warunkiem absorpcji promieniowania typu magnetycznego.
- Drukowana próbka o grubości 1 mm nie zapewniała wystarczających warunków do zaistnienia zjawisk wspomagających straty wewnętrzne.

Sproszkowana miedź w PLA nie stanowi dobrego absorbera mikrofal, ponieważ nie posiada kluczowych mechanizmów strat, a przy tym generuje duże odbicia (niedopasowanie impedancji), co potwierdzają wyniki redukcji sygnału (maks. 3,76 dB). Te uzyskane nieco ponad 50% mniejszego echa radarowego mogły pochodzić w dużej mierze także z efektu rozpraszania sygnału od nierównej powierzchni próbki.

Ponadto w zakresie ekranowania EMC:

- Rozproszony w polimerowej matrycy proszek miedzi nie zapewniał ciągłej sieci przewodzącej.
- Konduktywność takiego filamentu jest rzędy niższa, by spełnić wymagania ekranowania EMC.
- Filament z zawartością miedzi nie zapewnia ani wystarczającej przewodności w celu odbicia promieniowania, ani wystarczającej absorpcji, aby promieniowanie pochłonąć.

Filament PLA ze sproszkowaną miedzią w pewnym – niewielkim stopniu ekranuje fale elektromagnetyczne,

jednak nie nadaje się do wykorzystania jako ekran EMC, czy klatki Faradaya.

Badania przeprowadzano w ramach poszukiwania materiałów o cechach maskujących, czyli o dobrych właściwościach absorbujących w zakresie radarowym i ekranowania EMC, naturalnych kolorach, o znanych parametrach przewodnictwa cieplnego (ekranowanie lub odprowadzenie ciepła), a jednocześnie możliwych do łatwego zastosowania do wytwarzania obudów urządzeń elektronicznych z przeznaczeniem wojskowym. Badany materiał ma pewien potencjał maskujący, ale niezbędne są dalsze badania i np. zwiększenie grubości lub wprowadzenie domieszek na bazie ferrytów lub węgla.

Podziękowania dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) za wsparcie finansowe projektu „Wydajne i lekkie układy zasilające złożone z ogniwa słonecznego i baterii litowo–jonowej oraz ogniwa słonecznego i superkondensatora przeznaczone do zastosowań specjalnych" otrzymane w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne technologie materiałowe". (Nr TECHMATSTRATEG1/347431/14/ NCBR/2018).

Przyjęto: 05.10.2025, **zaakceptowano:** 04.11.2025, **opublikowano:** 24.11.2025

LITERATURA

[1] Ullah, M. U., Bin Abdul Latef, T., Othman, M., Hussein, M. I., Alkhoori, H. M., Yamada, Y., Kamardin, K., Khalid, R. (2024). A progression in the techniques of reducing RCS for the targets. Alexandria Engineering Journal, 100, 153-169. DOI: 10.1016/j.aej.2024.05.001

[2] Thomas, P., Abdulhakim, L. V., Pushkaran, N. K., Karuvandi, A. C. (2020). Wideband Radar Absorbing Structure Using Polyaniline-Graphene Nanocomposite. C, 6(4), 72. DOI: 10.3390/c6040072

[3] Plebankiewicz I., Przybył W., Kwaśnicki P., Bogdanowicz K.A., Iwan A. (2024). Ochrona krzemowych paneli fotowoltaicznych i ładowarek słonecznych przed rozpoznaniem radarowym. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY R. 100 NR 11/2024, DOI: 10.15199/48.2024.11.28

[4] Ruiz-Perez F., López-Estrada S.M., Tolentino-Hernández R.V., Caballero-Briones F. (2022). Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 7, 3, 100454, DOI: 10.1016/j.jsamd.2022.100454

[5] Saha Arun K., Pendleton Walker G. (2022). Role of Dielectric Loss in Microwave Absorber Design. SoutheastCon Mobile, AL, USA, 542-543, DOI: 10.1109/SoutheastCon48659.2022.9764067

[6] Przybył, W., Januszko, A., Radek, N., Szczepaniak, M., Bogdanowicz, K.A., Plebankiewicz, I., Szczodrowska, B. Mazurczuk, R. (2023). Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications. Defence Technology, 22, 1–9, DOI: 10.1016/j.dt.2022.06.013

[7] Akyol M., Altay M., Parajuli S., Tekşen F., Karaaslan M. (2024). Electromagnetic wave absorption in polyaniline coated Y3Fe5O12/Carbon-Black hybrid composites, Journal of Alloys and Compounds, 1005, 175911, DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.175911

[8] Abdulkarim Y. I., Mohanty A., Acharya O. P., Appasani B., Khan M. S., Mohapatra S. K., Muhammadsharif F. F., Dong J. (2022). A. Review on Metamaterial Absorbers: Microwave to Optical, Frontiers in Physics, 10, 893791, DOI 10.3389/fphy.2022.893791

[9] Przybył W., Plebankiewicz I., Bogdanowicz K.A., Kwaśnicki P., Wojciechowski A., Iwan A. (2024). Badania radarowe paneli fotowoltaicznych w kontekście ich ochrony radiolokacyjnej. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 100 NR 11/2024, DOI: 10.15199/13.2024.9.1