

dr inż. KRZYSZTOF GRYZ
 dr inż. JOLANTA KARPOWICZ
 dr inż. AGNIESZKA KURCZEWSKA
 mgr inż. AGNIESZKA STEFKO

Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy

dr inż. ALBERT SMALCERZ
 Politechnika Śląska

Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (3) – przegląd wybranych materiałów barierowych

Umieszczenie między źródłem pola a chronionym obiektem materiału barierowego, rozpraszającego lub pochłaniającego pole elektromagnetyczne, jest kluczowym elementem zarówno ekranowania lokalizującego i osłaniającego, jak i konstruowania ubioru chroniącego pracownika przed nadmiernym oddziaływaniem pola elektromagnetycznego. W artykule omówiono materiały barierowe, możliwe do wykorzystania w celu ochrony przed ekspozycją na pola elektryczne lub magnetyczne różnych częstotliwości. Szczególną uwagę zwrócono na materiały o właściwościach przydatnych do konstrukcji odzieży ochronnej.

Reduction of occupational hazards in the vicinity of electromagnetic field sources (3) – review of barrier's materials

The presence of barrier's structure (reflecting or absorbing) between electromagnetic field source and protected object is the basic element for localizing shielding and covering shielding, as well as design of protective cloths against excessive exposure of workers to electromagnetic fields. Materials of barrier's structures, useful for protection against exposure to electric or magnetic fields of various frequencies were presented. Special attention was paid on materials of properties useful for design of protective clothes.



Fot. Ryan Smart

Wstęp

Niniejszy artykuł jest kontynuacją tematu ograniczania ryzyka zawodowego wynikającego z ekspozycji pracowników na pole elektromagnetyczne małych i średnich częstotliwości [1, 2]. Jednym ze sposobów ograniczania ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych jest ekranowanie elektromagnetyczne. Może być ono zrealizowane jedną z metod:

- wstawienie „bariery” (pochłaniającej lub rozpraszającej pole elektromagnetyczne) między źródło pola a obszar, w którym poziom pola elektromagnetycznego ma być obniżony
- wprowadzenie dodatkowych źródeł pola, których zadaniem jest obniżenie poziomu pola elektromagnetycznego w określonym obszarze przez jego wytłumienie.

Wykorzystanie „bariery” jest podstawą zarówno klasycznego ekranowania lokalizującego (tj. ekranowania źródła pola otaczającym go ekranem), jak i osłaniającego (tj. ekranowania stanowiska pracownika ekranem usytuowanym jedynie przy nim), którego przypadkiem szczególnym jest ekranowanie pracownika za pomocą odzieży ochronnej.

Wybór metody zmniejszania poziomu narażenia zależy od właściwości źródła (elektromagnetycznych lub mechanicznych) i od cech obszaru, w którym należy zredukować poziom pola elektro-

magnetycznego. Dodatkowe czynniki, które należy brać pod uwagę to np. koszt lub trwałość struktury barierowej. W artykule zaprezentowano przegląd materiałów, o właściwościach umożliwiających wykorzystanie ich do konstrukcji barier chroniących przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych, zarówno ekranów jak i odzieży ochronnej.

Ekranowanie elektromagnetyczne

Wstawianie „barier” (ekranów) jest szczególnie skuteczną metodą redukcji poziomu pola elektromagnetycznego, jeżeli materiał, z którego wykonany jest ekran, ma dużą konduktywność lub jego parametry konstytutywne zapewniają wysoki poziom tłumienia. Propagacja fali w ośrodku o przenikalności magnetycznej μ , przenikalności elektrycznej ϵ i konduktywności σ jest wyrażona zależnością:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} = \alpha + j\beta \quad (1)$$

gdzie: α jest tłumieniem fali, β przesunięciem fazowym. Odpowiednia kombinacja wartości parametrów μ , ϵ , σ daje wzrost wartości tłumienia α co jest celem skutecznego ekranowania.

Podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości ekranujące materiału jest skuteczność ekranowania. **Skuteczność ekranowania (SE)** jest

wskaźnikiem osłabienia pola elektromagnetycznego, występującego w określonym punkcie przestrzeni, wskutek wprowadzenia materiału ekranującego (bariery) pomiędzy tym punktem, a źródłem pola. Najczęściej w literaturze jest ona definiowana jako stosunek natężenia pola elektrycznego, $E_0(r)$ (lub magnetycznego $H_0(r)$), występującego w określonym punkcie rozpatrywanego układu bez ekranu do natężenia pola elektrycznego, $E_1(r)$ (lub magnetycznego, $H_1(r)$) w tym samym punkcie, ale w układzie z ekranem.

Skuteczność ekranowania może być wyrażana w decybelach, dB:

$$SE_E = 20 \log \frac{|E_0(r)|}{|E_1(r)|} \quad (1)$$

$$SE_H = 20 \log \frac{|H_0(r)|}{|H_1(r)|} \quad (2)$$

$$SE_P = 10 \log \frac{|P_0(r)|}{|P_1(r)|} \quad (3)$$

lub w wielkościach niemiarowanych albo w procentach.

Skala decybelowa jest szczególnie często stosowana w radiotechnice i telekomunikacji, odnośnie do pól elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości. Określanie skuteczności ekranowania, jako niemiarowanej krotności osłabienia pola jest sposobem bardziej użytecznym w przypadku pól małych częstotliwości i analiz na potrzeby bezpieczeństwa i higieny pracy. Ułatwia to operowanie tym parametrem przez osoby mniej obeznane z używaniem jednostek wyrażanych w decybelach.

Ekran elektromagnetyczne – materiały

Postęp technologiczny sprawia, że obok stosowanych od wielu lat takich materiałów ekranujących, jak blachy lub siatki metalowe, pojawiają się ich nowe rozwiązania. Obecnie do ekranowania pola elektromagnetycznego mogą być stosowane następujące materiały:

- metaliczne, metalizowane i zawierające elementy metalowe
- ferromagnetyczne
- ferroelektryczne
- ferrimagnetyczne
- cienkie filmy i powłoczenia elektroprowadzące
- strukturalne (np. plastik, beton)
- nanomateriały
- polimery elektroprowadzące
- elektroprowadzące szkło i materiały przezroczyste
- papier elektroprowadzący
- kompozyty
- metamateriały
- nadprzewodniki wysokotemperaturowe [3].

Poniżej zaprezentowano wybrane materiały ekranujące, które mogą być brane pod uwagę przy opracowywaniu materiałów włókienniczych o właściwościach ekranujących i projektowaniu środków ochrony indywidualnej przed polami elektromagnetycznymi.

Do ekranowania pola elektromagnetycznego, głównie jego składowej elektrycznej, stosowane są materiały tekstylne o wysokiej przewodności elektrycznej, rzędu MS/m. W celu uzyskania takich właściwości materiału tekstylnego, do jego konstrukcji wprowadzane są elementy elektroprowadzące, np. ze stali nierdzewnej, srebra, niklu, miedzi i węgla lub ich połączeń. Do wytworzenia materiałów tekstylnych o właściwościach elektroprowadzących stosuje się następujące surowce:

- przędze z zawartością włókien metalowych
- przędze z włókien węglowych
- przędze z rdzeniem elektroprowadzącym, np. z rdzeniem węglowym w otoczce polimerowej
- przędze metalizowane, w tym z wykorzystaniem metody plazmowej
- przędze z włókien zawierających wewnątrz lub na powierzchni różne dodatki elektroprowadzące, jak sadza, grafit, metale, półprzewodniki.

Do wyrobów tekstylnych o właściwościach elektroprowadzących zalicza się również włókniny wykonane z udziałem włókien metalowych lub węglowych, tkaniny powleczone metalem przy zastosowaniu metody plazmowej oraz różne typy materiałów kompozytowych.

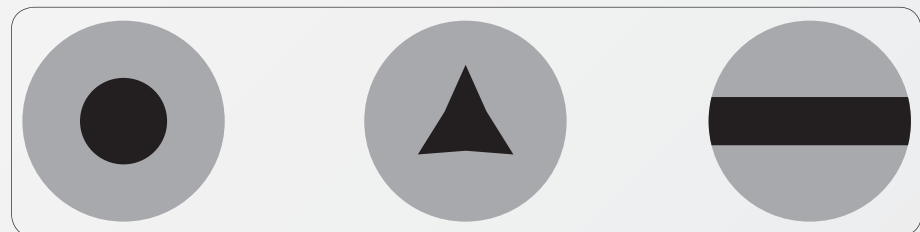
Nowoczesne konstrukcje przędz są zazwyczaj elektrycznie niejednorodnymi kompozytami składającymi się z włókien polimerowych i niewielkich ilości elektroprowadzących składników (np. węgla, stali, srebra, miedzi). Elementy te mogą być rozmieszczone w strukturze materiału w wątku, osnowie lub w formie siatki. Z kolei elementy elektroprowadzące mogą być w różny sposób umieszczane w strukturach przędzy dwu- lub wieloskładnikowych. Przykład przędzy dwuskładnikowej pokazano na rys. 1.

Materiały metalowe i ferromagnetyczne

Większość barier ekranujących jest konstruowana ze standardowych materiałów przewodzących (np. niemagnetycznych) lub materiałów ferromagnetycznych. W materiałach tekstylnych do ich powlekania stosowano najczęściej miedź, nikiel, srebro oraz połączenia tych metali. Zawartość domieszek w materiale może istotnie zmieniać konduktywność materiału wyjściowego. Podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości materiału ekranującego jest jego konduktywność (tab. 1.), która może zależeć od temperatury oraz utleniania się jego powierzchni i wpływać na zmianę parametrów ekranujących w czasie.

Skuteczność ekranowania w przypadku materiałów niemagnetycznych jest związana głównie ze zjawiskiem odbicia pola, a nie jego absorpcji [4]. Materiały niemagnetyczne charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi i dlatego są częściej stosowane. Przenikalność magnetyczna większości ferromagnetyków zmniejsza się wraz z częstotliwością, co obniża możliwości ich stosowania do skutecznego ekranowania pola magnetycznego (przy częstotliwości ok. 0,1 MHz $\mu \approx 1$).

Przykładem materiałów o właściwościach ferromagnetycznych w temperaturze pokojowej są: żelazo, nikiel i kobalt, jak również ich stopy oraz tlenki. Stopy ferromagnetyczne mogą również zawierać pewne ilości metali nie-ferromagnetycznych, jak: mangan, miedź, aluminium. Stopy o dużej przenikalności magnetycznej to np. Permalloy (stop magnetyczny) i Mumetal (magnetyczny stop z grupy: Ni-Fe-Cu-Cr) [5]. Do materiałów ferromagnetycznych zalicza się również związki o wzorze ogólnym $Me, Fe^{+3}yO_z$, gdzie Me jest jedno-, dwu- lub trójwartościowym metalem oraz ferryty typu $BaOFe_2O_3$ i $9BaO Fe_2O_3$ [4]. Takie materiały, jak μ -metale i super Malloy charakteryzują się dużą przenikalnością magnetyczną przy



Rys. 1. Przykładowe przekroje przędzy dwuskładnikowej
Fig. 1. Examples of cross sections of bi-component yarn

Tabela 1

Konduktywność wybranych metali wykorzystywanych do ekranowania elektromagnetycznego (T = 20 °C)
Conductivity of selected metals

Materiał	Konduktywność σ , S/m
Srebro	$6,3 \cdot 10^7$
Miedź	$5,9 \cdot 10^7$
Miedź przemysłowa	$5,8 \cdot 10^7$
Złoto	$4,5 \cdot 10^7$
Aluminium	$3,8 \cdot 10^7$
Aluminium przemysłowe	$3,7 \cdot 10^7$
Ołów	$4,8 \cdot 10^6$
Brąz fosforowy	$4 \cdot 10^6$
Brąz aluminiumo-niklowy	$2 \cdot 10^6$
Cyna	$9,2 \cdot 10^6$
Mosiądz	$1,5 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^7$
Stal	$5 \cdot 10^6 - 10^7$

względnie małym natężeniu pola magnetycznego. Wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego następuje nasycenie materiału, któremu towarzyszy spadek przenikalności magnetycznej. Ponieważ przenikalność magnetyczna zmienia się znacząco, kiedy materiał jest bliski nasyceniu, wówczas w celu zwiększenia skuteczności ekranowania silnych pól magnetycznych można zwiększyć grubość ekranu, co spowoduje wzrost strat absorpcji. Przy częstotliwościach większych od kilku MHz każdy metal może być zastosowany do efektywnego ograniczania pól magnetycznych [5].

Jednym z materiałów stosowanych do ekranowania pola magnetycznego mogą być ferromagnetyczne stopy amorficzne o małym współczynniku magnetostrykcji, odporne na odkształcenia mechaniczne. Przykładem stopu amorficznego przeznaczanego do stosowania w ekranach magnetycznych jest stop o nazwie handlowej Metglass 2826 o składzie chemicznym: $Fe_{40}Ni_{40}P_{10}B_6$. Stopy amorficzne mogą być wykorzystywane do wytwarzania płaskich nitok metalowych techniką odlewania i dalszego przetwarzania ich w płaski wyrób włókienniczy.

Materiały ferrimagnetyczne

Materiały ferromagnetyczne po przekroczeniu temperatury Curie wykazują właściwości paramagnetyczne. Znajdują się w nich obszary stałego namagnesowania, tzw. domeny magnetyczne (obszary, w których spiny atomów pod działaniem siły ustawiają się równolegle), wytwarzając wokół siebie pole magnetyczne. Występuje w nich zjawisko nasycenia magnetycznego – wszystkie elementarne dipole magnetyczne ustawiają się w kierunku zewnętrznego pola magnetycznego.

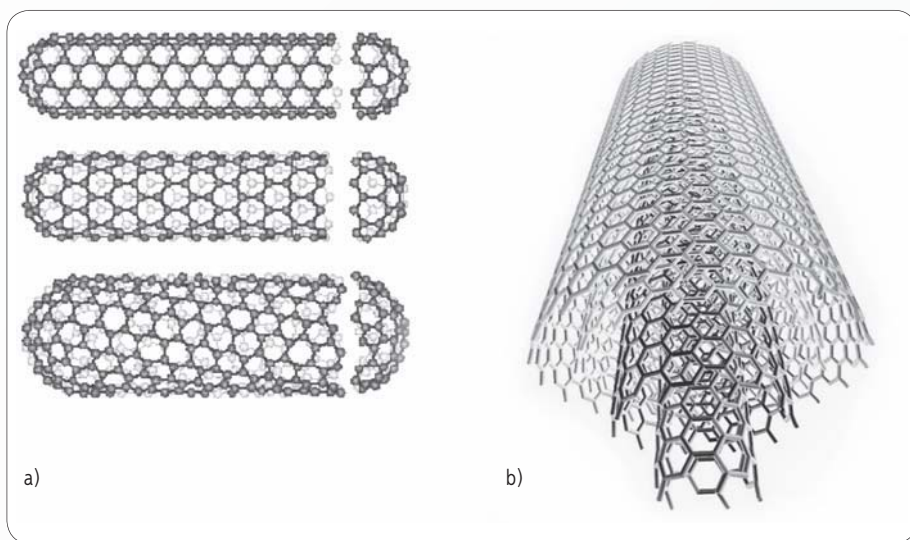
Jeżeli pojawia się spontaniczne antyrównoległe uporządkowanie elementarnych momentów magnetycznych i momenty te nie kompensują się wzajemnie do zera, to takie materiały nazywane są ferrimagnetykami i ze względu na dużą wartość względnej przenikalności magnetycznej (np. ferryty: $\mu \approx 5000, \sigma < 10^6$) są szeroko stosowane do ekranowania pola magnetycznego wielkiej częstotliwości [6].

Materiały ferroelektryczne

Ferroelektrykami są materiały dielektryczne, w których występuje trwałe uszeregowanie dipoli elektrycznych na skutek oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego (np. sól z Rochelle). Wykorzystywanie materiałów ferroelektrycznych jest ograniczone jedynie do urządzeń elektronicznych, ponieważ charakteryzuje się anizotropią, dużymi stratami mocy oraz wrażliwością głównych parametrów na zmiany temperatury. Przenikalność elektryczna względna ($\epsilon > 3000$) zależy od struktury i mieszanki oraz sposobu uzyskania materiału.

Cienkie folie (filmy) i powłeczna elektroprzewodzące

Współczesna technologia pozwala na wytwarzanie tego rodzaju materiałów ekranujących o grubości od ok. 1 μm do dziesiątek μm , co jest zaletą (m.in. ze względu na wagę) w porównaniu z tradycyjnymi metalowymi materiałami ekranującymi. Ekranowanie z zastosowaniem cienkich warstw przewodzących jest efektywne jedynie w odniesieniu do częstotliwości powyżej kilkudziesięciu MHz. Ważnym parametrem



Rys. 2. Nanorurki węglowe jednościenne (a) i wielościenne (b) [22]
 Fig. 2. Carbon nano-tubes, uni-walls (a) and multi-walls (b) [22]

REZYSTYWNOŚĆ (ODPORNOŚĆ WŁAŚCIWA) I GRUBOŚĆ WARSTW POWLECZENIA
 Resistivity and thickness of covering layers

Tabela 2

Technika powlekania	Rezystywność $\rho, \Omega \cdot m$	Grubość warstwy $d, \mu m$
Powlekanie bezprądowe	0,01-0,03	1-100
Malowanie warstw przewodzących	0,020-0,05	10-75
Metalizowanie próżniowe	0,05-0,1	5-10
Powlekanie elektrolityczne	0,007-0,02	10-25



Fot. Jolanta Karpowicz. Ubiór chroniący przed promieniowaniem mikrofalowym, opracowany przez CIOP-PIB

cienkich przewodzących warstw jest rezystywność powierzchniowa, odwrotnie proporcjonalna do konduktywności i grubości warstwy.

Do wytwarzania tego rodzaju materiałów ekranujących wykorzystywane są technologie: powlekanie bezprądowe, malowanie warstw przewodzących, metalizowanie próżniowe, powlekanie elektrolityczne.

W tabeli 2. przedstawiono podstawowe parametry materiałów ekranujących wytwarzanych z zastosowaniem technik nakładania warstw.

Nanomateriały

Nanomateriały zawierają cząstki lub włókna o rozmiarach nie przekraczających 100 nm. Wprowadzenie różnego rodzaju nanocząstek do tekstyliów powoduje np. wzrost odporności termicznej, zmniejszenie palności, polepszenie charakterystyk wytrzymałościowych i podwyższenie właściwości elektroprzewodzących [7].

Przykładem nanostruktur są nanorurki węglowe i rozwarstwione nanopłytki grafitowe. Rozwarstwione **nanopłytki** grafitowe są to pojedyncze płytki grafitowe o rozmiarach nanometrów. Ich zaletą jest lekkość, zdolność przewodzenia ciepła i prądu. Jednak w porównaniu z nanorurkami węglowymi cechują się mniejszą wytrzymałością mechaniczną i niższą ceną.

Nanorurki węglowe są zbudowanymi z węgla strukturami nadcząsteczkowymi, mającymi postać walców ze zwiniętego grafenu (warstwy o grubości jednego atomu). Najcieńsze mają średnicę rzędu jednego nanometra, a ich długość może być miliony razy większa. Nanorurki są jednymi z najwytrzymalszych i najszywniejszych znanych materiałów. Wykazują niecodziennie wysoką wytrzymałość na rozrywanie i unikatowe właściwości elektryczne (mogą być one przewodnikami lub półprzewodnikami w zależności od ułożenia linii wiązań wzdłuż albo w poprzek nanorurki; teoretycznie mogą przewodzić prąd o 1000-krotnie większym natężeniu niż przewody metalowe o analogicznej masie). Są one również znakomitymi przewodnikami ciepła. Cechują się dużą stabilnością chemiczną i bardzo dużą zdolnością do elastycznych i odwracalnych odkształceń pod wpływem sił ściskających lub zginających, co wynika z elastyczności i „puste” struktury, przy czym właściwości nanorurek zależą też od ich skrętności [7, 8]. Nanorurki nie są natomiast wytrzymałe na zgniatanie. Materiały te jednak wciąż są w fazie opracowań, a koszt ich wytwarzania jest wysoki. Kompozyty polimerowe (jak: poliestry, poliwęglany i poliamidy) z udziałem nanorurek mogą stać się przewodnikami elektrycznymi. Nanorurki węglowe zastosowane do produkcji włókien powodują zmianę właściwości polimerów, są idealnym dodatkiem stosowanym do wzmocnienia polimerów z uwagi na bardzo dużą wytrzymałość mechaniczną. Kompozyty włókien i nanorurek węglowych wykazują wysoką przewodność elektryczną. Dodatek nanorurek węglowych do polimeru może 100 razy zwiększyć przewodnictwo materiału przy dużo mniejszej zawartości węgla, co ma znaczenie w przypadku polimeru, gdyż powoduje, że jest on zewnętrznie gładki, mniej zanieczyszczony i cechuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi. Dzięki aplikacji nanorurek węglowych można wytwarzać wyroby o podwyższonej wytrzymałości, wyroby elektroprzewodzące, które są bardziej elastyczne i nie tak łamliwe, jak włókna węglowe [7].

W badaniach prowadzonych w kraju nad nanorurkami węglowymi zaobserwowano interesujące właściwości nanorurek wielościennych, tj. częściowe ekranowanie pola magnetycznego we wnętrzu nanorurki w wyniku prądów płynących w poszczególnych ściankach [9]. Na rys. 2. pokazano budowę nanorurek jednościennych i wielościennych. Obecnie na świecie prowadzone są prace zmierzające do wytworzenia przedz wyłącznie z nanorurek, gdyż zakłada się, że będą one charakteryzowały się lepszymi właściwościami w porównaniu do przedz dotychczas wytwarzanych [8].

Ważną grupą nanomateriałów są nanostruktury o budowie periodycznej. Stosuje się je do tworzenia metalo-dielektrycznych warstw, które stanowią nieprzepuszczalny ekran dla fal elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych, ale jednocześnie są całkowicie przepuszczalne dla fal optycznych. Inne nanomateriały, tzw. nanomieszanki, formowane w trakcie losowego rozmieszczania cząstek o wymiarach nanometrów w matrycy polimeru, wykorzystuje się jako absorbery pola elektromagnetycznego. Materiały te selektywnie ekranują pole elektromagnetyczne w odniesieniu do różnych częstotliwości [3].

Polimery elektroprzewodzące

Polimery elektroprzewodzące są to polimery o układach sprzężonych. Do grupy tej należą m.in. polipirole, polianilina i PEDOT. Polimery elektroprzewodzące stanowią obiecującą grupę materiałów ekranujących pole elektromagnetyczne. Ze względu na stosunkowo dużą wartość przewodności i przenikalności dielektrycznej, które można łatwo kontrolować chemicznie w procesie produkcji, mogą one w znaczący sposób redukować pole elektromagnetyczne. Bardzo ciekawą próbką polimeru elektroprzewodzącego mają dużą, i co ważne prawie niezależną od temperatury skuteczność ekranowania. Przewodność zależy od domieszkowania i geometrii polimeru, który następnie może być przetwarzany jako przedz, szczególnie polianilina [10]. Wadą polianiliny jest wrażliwość na działanie np. tlenu i wody.

Polipirol jest jednym z najważniejszych polimerów przewodzących. Cechuje się dużą trwałością, odpornością na warunki atmosferyczne i biokompatybilnością. Może być stosowany do modyfikacji różnych materiałów, w tym tekstyliów [10]. Polianilina lub polipirol, nie są powszechnie stosowane ze względu na trudności w ich przetwarzaniu i wysokie koszty. Poza tym cechują się małą wytrzymałością mechaniczną. W przypadku tych polimerów nie jest konieczne wprowadzanie przewodzących napełniaczy w celu uzyskania właściwości ekranujących, co jest ich niewątpliwą zaletą w porównaniu z innymi polimerami. Jednak wprowadzenie przewodzących napełniaczy do polimerów przewodzących zwiększa efekt ekranowania przez umożliwienie połączeń pomiędzy przewodzącymi cząstkami – czyli utworzenie tzw. ścieżek przewodzących.

Szko elektroprzewodzące, materiały przezroczyste i papier przewodzący

Szko elektroprzewodzące i materiały przezroczyste zawierają cienkie warstwy metaliczne i półprzewodzące, tj. złoto, stop srebra, ind, cynk, cyna, tlenki ceru [11]. Typowa grubość materiałów mieści się pomiędzy 10 a 100 nm. Rezystywność powierzchniowa zawiera się w przedziale od 0,5 do 10 Ω/m^2 . Papiery elektroprzewodzące wytwarzane są przez zmieszanie drewna

lub syntetycznej masy z metalizowanymi włóknami poliestru, których powierzchnie są pokryte niklem lub miedzią i niklem. Materiały te używane są w polach o częstotliwości powyżej 30 MHz [12].

Materiały kompozytowe

Przykładem materiałów, które charakteryzują się zjawiskiem wielokrotnego odbicia pola elektromagnetycznego są kompozyty, zawierające napełniacz o dużej powierzchni właściwej. Mogą to być kompozyty polimerowe zawierające napełniacze elektroprzewodzące, np. cząsteczki metalu i węgla czy włókna węglowe. Ich podstawową zaletą jest mała masa, a także niski koszt, łatwe przetwórstwo i odporność korozyjna. W przypadku kompozytów z napełniaczem skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego wzrasta wraz ze wzrostem zawartości napełniacza i ze wzrostem jego wydłużenia. Przy pewnej wartości granicznej zawartości napełniacza, cząstki lub włókna są wystarczająco blisko upakowane, aby uformować nieprzerwaną ścieżkę przewodzącą przez kompozyt i przewodność materiału znacznie wzrasta. Jeśli grubość kompozytu będzie zbyt mała w stosunku do odległości pomiędzy cząstkami napełniacza, wówczas zjawisko wielokrotnego odbicia fal może nie wystąpić. Wielokrotne odbicie fal występuje szczególnie intensywnie w kompozytach, w których napełniacz ma małe rozmiary, dlatego dobrym materiałem do takich zastosowań są nanokompozyty zawierające napełniacz w postaci nanocząstek. Jednym z nanomateriałów stosowanych do ekranowania pola elektromagnetycznego jest magnetooprowy manganit o nanometrycznych rozmiarach ziarna [13].

Coraz szersze zastosowanie w nowoczesnych technologiach, w tym do ekranowania pola elektromagnetycznego, znajdują również polimery z pamięcią kształtu, do których wprowadza się nanorurki węglowe. Charakteryzują je: lekkość konstrukcji, mała sztywność i dobra podatność na kształtowanie. Materiały kompozytowe, będące matrycą dielektryczną z napełniaczem przewodzącym lub magnetycznym różnego kształtu i o różnych wymiarach, stają się nowymi materiałami znajdującymi zastosowanie do ekranowania szerokiego zakresu częstotliwości i są wysoce wydajne. Jako wypełniacze stosowane są też materiały ferromagnetyczne, ferroelektryczne, ferryty i metale. Główną wadą struktur opartych na ferrytach jest absorpcja rezonansowa pola elektromagnetycznego i skutkiem tego ograniczony zakres częstotliwości, w której mogą być stosowane [14].

Metamateriały

Metamateriałami nazywane są jednorodne struktury kompozytowe o właściwościach elektromagnetycznych, zawierające periodycznie rozmieszczone wtrącenia w matrycy bazowej, w których wymiary tych wtrąceń i odległości pomiędzy nimi są niewielkie w porównaniu z długością fali elektromagnetycznej. Najbardziej powszechną klasą metamateriałów są takie, dla których wartości efektywne przenikalności magnetycznej i elektrycznej są ujemne. Materiały o takich właściwościach można stosować, aby osiągnąć wsteczną propagację fali elektromagnetycznej w materiale. Dotychczas ich zastosowanie nie jest powszechne i nie przebadano dokładnie właściwości ekranujących metamateriałów, jednakże wiadomo już, że ich działanie jest selektywne ze względu na częstotliwość [3].

Podsumowanie

Zaprezentowany przegląd materiałów charakteryzujących się barierowością odnośnie do pola elektromagnetycznego wskazuje na możliwości tworzenia zarówno różnego rodzaju klasycznych ekranów, jak i środków ochrony indywidualnej. Dotychczasowe prace konstrukcyjne (prowadzone od kilkudziesięciu lat na całym świecie) dotyczyły głównie opracowania wyrobów zabezpieczających przed promieniowaniem z zakresu radio- i mikrofalowego operatorów urządzeń nadawczych (łączności i radiolokacji) oraz pracowników zajmujących się ich naprawą i konserwacją. Opracowano zarówno efektywne ekrany poszczególnych elementów urządzeń, jak i ekranujące materiały włókiennicze na odzież ochronną. Zwykle materiały te charakteryzują się skutecznością ekranowania na poziomie co najmniej kilkudziesięciu dB (ponad 10-krotne osłabienie natężenia pola) w paśmie częstotliwości od kilkudziesięciu MHz do kilku GHz. Dla mniejszych częstotliwości właściwością ekranującą pogarszają się, szczególnie odnośnie do składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego.

W wielu przypadkach ze względu na mobilność pracownika, konieczność ręcznej obsługi urządzeń będących źródłami pola i dostępu do nich dla pracownika, ekranowanie urządzenia lub stanowiska pracownika jest niemożliwe. Wtedy rolę bariery dla pola elektromagnetycznego powinny spełniać środki ochrony indywidualnej. Do ich konstrukcji niezbędne są materiały włókiennicze o odpowiednich właściwościach ekranujących i użytkowych. Z uwagi na trudności w doborze materiału zapewniającego skuteczne tłumienie pola magnetycznego małej lub średniej częstotliwości ograniczenie ekspozycji pracowników jest w tym przypadku najtrudniejsze. Przy modelowaniu i opracowywaniu materiałów włókienniczych oraz konstruowaniu środków ochrony indywidualnej należy uwzględnić wymagania, wynikające ze specyfiki warunków ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne i warunków wykonywania pracy w otoczeniu źródeł pól, zapewniając m.in.:

- skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego odpowiednią do poziomu narażenia na stanowisku pracy
- konstrukcję nie utrudniającą pracownikowi wykonywania czynności zawodowych
- odporność mechaniczną materiału ekranującego np. na zginanie
- odporność na zapalenie
- odporność materiałów barierowych na działanie takich czynników występujących w środowisku pracy, jak: podwyższona temperatura, mgła olejowa, wilgoć.

Opracowanie materiału włókienniczego o parametrach pozwalających na skuteczne ekranowanie pola elektromagnetycznego może być znacznie utrudnione, jeżeli materiał ten miałby jednocześnie spełniać wymagania w zakresie właściwości ergonomicznych i użytkowych. Zaprezentowany w artykule przegląd materiałów ekranujących wskazuje, że wzrastają możliwości techniczne tworzenia odzieży ochronnej, szczególnie rozwój nanotechnologii i poszerzenie oferty dostępnych środków ochrony indywidualnej poza odzież chroniącą przed promieniowaniem częstotliwości radiowych i mikrofalowych. Pożądane jest podjęcie działań związanych z tworzeniem nowych

tekstylnych materiałów ekranujących przed polami małej i średniej częstotliwości, gdyż wiele urządzeń jest źródłem ekspozycji pracowników na silne pola o wymienionych zakresach częstotliwości. Ze względu na trudności techniczne i koszty tworzenia i stosowania ubiorów ochronnych rozwiązaniem najbardziej preferowanym jest nadal instalowanie klasycznych ekranów pola elektromagnetycznego wokół urządzeń wytwarzających silne pola. Ostatni artykuł z prezentowanego cyklu będzie omawiał możliwości ekranowania pola magnetycznego wytwarzanego przez urządzenia elektrotermiczne.

PIŚMIENICTWO

- [1] J. Karpowicz, K. Gryz *Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (1) – środki ochrony zbiorowej i indywidualnej*. „Bezpieczeństwo Pracy” 1(448)2009, s. 6-9
- [2] J. Karpowicz, K. Gryz *Ograniczanie ryzyka zawodowego przy źródłach pól elektromagnetycznych (2) – wybrane źródła pól i charakterystyka odzieży ochronnej do ich obsługi*. „Bezpieczeństwo Pracy” 2(449)2009, s. 2-5
- [3] S. Celozzi, R. Araneo, G. Lovat *Electromagnetic shielding*. Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2008
- [4] J. Koprowska, M. Pietranik, W. Stawski *New type of textiles with shielding properties*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2004, vol. 12, nr 3(47), 39-42
- [5] P. Rossi, R. Falsaperla *Reduction of exposure to electromagnetic fields: Principles of shielding and mitigation*. Materiały Międzynarodowego Seminarium pn. *Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy*. Warszawa, 2005
- [6] A. J. Baden Fuller *Ferrites at Microwave Frequencies*. London, Peregrinus 1987
- [7] B. Surma *Nanoukłady oparte na nanorurkach węglowych*. „Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra” 2006, 9, 52-55
- [8] W. Bendkowska *Zastosowania nanotechnologii w przemyśle włókienniczym*, Przegląd Włókienniczy, 2003, 5, 17-21
- [9] E. Zipper *Niezwykłe własności nanorurek węglowych*. „Postępy Fizyki”, tom 57, zeszyt 3, 2006
- [10] W. Bendkowska *Tekstylnia inteligentne – przegląd zastosowań*. Część II. *Tekstylnia elektroprowadząca i tekstylnia zintegrowana z mikrosystemami elektronicznymi*. „Przegląd Włókienniczy”, 9, 2002, 16-19
- [11] R. C. Hansen, W. T. Pawlewicz *Effective conductivity and microwave reflectivity of thin metallic films*. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2005, vol. 30, no. 11, pp. 315-320
- [12] S. Shinagawa, Y. Kumagai, H. Umehara, P. Jenvanitpanjakul *Conductive papers for electromagnetic shielding*. Proc. Internat. Conf. Electromagn. Interfer., 1999, 372-375, 1999
- [13] A. Boczkowska, K.J. Kurzydłowski *Postęp w zakresie nowych materiałów do zastosowań technicznych, w tym eliminujących oddziaływanie pola elektromagnetycznego*, Materiały z VI Międzynarodowego Sympozjum EL-TEX 2004 pn. *Pola elektrostatyczne i elektromagnetyczne – nowe materiały i technologie*, Łódź, 2004
- [14] V. Bogush *Application of electroless metal deposition for advanced composite shielding materials*. „Journal of Optoelectronics and Advanced Materials”, 2005, vol. 7, nr 3, 1635 – 1642
- [15] www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm

Publikacja przygotowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowywanego w latach 2008-2010 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

REGIONALNE OŚRODKI BHP

które otrzymały certyfikaty akredytacji wydane przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Ośrodek Szkolenia Ustawicznego i Kursów Zawodowych

ul. Kętrzyńska 35, 11-200 Bartoszyce
woj. warmińsko-mazurskie
(089) 762 0790; 601663586

Towarzystwo Naukowe Organizacji i Kierownictwa
ul. Jagienki 4, 15-542 Białystok
(85) 675-02-71

Ośrodek Doradztwa i Kształcenia BAJD
ul. Okrzei 10, 85-317 Bydgoszcz
(052) 348 65 60

Agencja Ochrony Pracy i Środowiska BHPE
ul. Fabryczna 1, 59-225 Chojnów, woj. dolnośląskie
(076) 81 87 943; (076) 81 87 843

Centrum Szkoleniowo-Doradcze LENAX
ul. Zygmunta Starego 6, 44-100 Gliwice
woj. śląskie
601-456-422, (032) 231-91-69, (032) 331-31-58

ATC s.c.
ul. Lipowa 1, 63-800 Gostyń, woj. wielkopolskie
(065) 572 04 08

Ośrodek Szkolenia, usług BHP i P.poż. GOMAR
ul. Reymonta 1, 37-500 Jarosław
woj. podkarpackie
(016) 623 06 52, 502 346 742, 502 244 438

Vademecum Ochrony Pracy
ul. Partyzantów 19, 75-411 Koszalin
woj. zachodniopomorskie
(094) 342 52 33

Centrum Kształcenia i Szkolenia Sp. z o.o.
os. Złota Jesień 2 31-826 Kraków
(012) 648 35 01

Wojewódzki Klub Techniki i Racjonalizacji
ul. Kościuszki 4, 20-086 Lublin
(81)532-13-39, 743-67-49

J&J Malbork
ul. Kościuszki 5a, 82-200 Malbork, woj. pomorskie
507-126-880

PRO-SILESIA
ul. Ozimska 14-16, 45-057 Opole
(077) 54 17 250

SANBONUS Sp. z o.o.
ul. Ożarowska 75, 27-600 Sandomierz
woj. świętokrzyskie
(015) 833 26 64

Ośrodek Szkolenia Konsultacji i Doradztwa Ochrony Pracy
ul. Warcka 6, 98-200 Sieradz, woj. łódzkie
(0-43) 827-17-20, 827-46-12

TBF s.c. Tomasz Fic, Patrycja Fic
ul. Lecha 12, 03-610 Warszawa
501-039-281, (22) 679-66-22

Zakład Doskonalenia Zawodowego
Stary Rynek 17, 65-958 Zielona Góra
(068) 329 59 00