



Projektowanie wielowarstwowych metalowych układów do tłumienia pól elektromagnetycznych

A. Kania, M. Spilka R. Nowosielski

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Materiałów Nanokrystalicznych i Funkcjonalnych oraz Zrównoważonych Technologii Proekologicznych
email: aneta.kania@polsl.pl

Streszczenie: W artykule zwrócono uwagę na konieczność stosowania wielowarstwowych metalowych układów do tłumienia sztucznych pól elektromagnetycznych. Zaprezentowano wyniki badań obejmujące: obserwacje struktur oraz badania topografii powierzchni układów wytworzonych metodami PVD i elektrolizy, jak i badania własności fizycznych.

Abstract: In the article the attention was paid to a need of multi-layer metal systems for electromagnetic fields shielding usage. The research results including: observation of structures and study of surface topography of systems fabricated by PVD method and electrolysis process, as well as the study of physical properties were presented.

Słowa kluczowe: tłumienie fal elektromagnetycznych, układy wielowarstwowe, badania metalograficzne, własności fizyczne

1. WSTĘP

Zagadnienia negatywnego oddziaływania sztucznych pól elektromagnetycznych na funkcjonowanie organizmów żywych oraz pracę różnych, coraz bardziej czułych elektronicznych urządzeń nabierają coraz większego znaczenia. Niezależnie od wielkości natężeń pól elektromagnetycznych występujących zarówno w środowisku zawodowym, jak i pozazawodowym, zawsze powinna być stosowana tzw. zasada ALARA (As Low As Reasonably Achievable), według której narażenie na pole elektromagnetyczne wytwarzane sztucznie, a działające na organizm człowieka, powinno być maksymalnie ograniczane.

Problem tłumienia pól elektromagnetycznych może być analizowany z różnych punktów widzenia, m.in. technicznego, społecznego oraz medycznego. W obszarze inżynierii materiałowej zagadnienie to sprowadza się głównie do poszukiwania nowych, coraz bardziej funkcjonalnych, skutecznych i ekonomicznych materiałów przeznaczonych na ekrany do tłumienia takich właśnie pól.

Na tej podstawie uważa się, że dalszy rozwój badań dotyczący ekranowania pól elektromagnetycznych powinien przede wszystkim obejmować poszukiwania zmierzające do:

- zwiększenia skuteczności tłumienia przy zmniejszającej się masie (grubości) ekranów oraz racjonalnych kosztach wytwarzania,
- zaprojektowania ekranów szerokopasmowych o możliwie maksymalnej tłumienności pola elektromagnetycznego,
- poprawy innych własności ekranów tj. mechanicznych (elastyczności), antykorozyjnych, stabilności czasowej, cieplnej itp.

2. Ekranowanie sztucznych pól elektromagnetycznych

Jednym ze sposobów zabezpieczenia przed szkodliwymi skutkami oddziaływania pól elektromagnetycznych jest ekranowanie. Idea ekranowania polega na ograniczeniu lub wyeliminowaniu niepożądanego źródła promieniowania poza określony obszar. Można również ograniczyć się do ochrony bezpośredniego otoczenia samych obiektów, które zabezpiecza się przed wpływem zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Ważna, w obydwu przypadkach, jest skuteczność działania ekranu, jak też koszty takiej ochrony [1].

Fizyczne podstawy ekranowania pól elektromagnetycznych opierają się na teorii Maxwella stanowiącej opis makroskopowych zdarzeń falowych zachodzących w materiale i w polu o określonej charakterystyce [2]. Teoria rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w materii opierająca się na rozwiązaniach równań Maxwella jest ogólna zwłaszcza w konfrontacji ze szczegółowymi wymaganiami praktyki. Związane to jest z tym, że równań Maxwella określonych algebraicznie nie można dokładnie rozwiązać dla pola rzeczywistego, a w przypadkach zastosowań praktycznych rezultaty wymagają zazwyczaj weryfikacji iskorygowania. Wszelkie rozwiązania równań są przybliżeniem i to dla układów najprostszych, w przypadku materiałów hybrydowych istnieją jeszcze większe problemy. Również dla rozwiązywania problemów propagacji fali elektromagnetycznej stosowane są przybliżone metody numeryczne, ale i one nie zawsze dają zadowalające rozwiązania. Z tych powodów najczęściej problemy tłumienia fal elektromagnetycznych rozwiązywane są eksperymentalnie.

Natężenie pola przechodzącego przez ekran tłumione jest w wyniku: odbicia, rozpraszania i absorpcji energii. Tłumienie odbiciowe zależy od: częstotliwości, rodzaju pola, właściwości materiału ekranu i odległości ekranu od źródła pola. W teorii zjawisk falowych efekt odbicia tłumaczy się niezgodnością impedancji falowych ekranu i środowiska otaczającego ekran. W rozważaniach praktycznych pomija się zwykle, jako mały, efekt tłumienia wynikający z odbicia energii wewnątrz materiału ekranu [3].

Tłumienie absorpcyjne zależy natomiast od: właściwości elektrycznych i magnetycznych materiału ekranu, jego grubości oraz częstotliwości, natomiast praktycznie nie zależy od rodzaju pola padającego na ekran.

Pod względem przeznaczenia wyróżnić można trzy rodzaje ekranowania [3,4]:

- ekranowanie lokalizujące,
- ekranowanie osłaniające,
- ekranowanie maskujące.

Istnieje również podział sposobu ekranowania ze względu na rodzaj pola na [1]: ekranowanie pola elektrycznego, pola magnetycznego i pola elektromagnetycznego.

Przy ekranowaniu pola elektrycznego wykorzystuje się zjawisko gromadzenia ładunków w stanie równowagi jedynie na powierzchni przewodnika, niezależnie od tego, w jaki sposób powstały.

Ekranowanie pola magnetycznego stosuje się, gdy pole szkodliwe jest statyczne lub wolnozmiennie.

Do ekranowania pól elektromagnetycznych o większej częstotliwości używane są metale ferromagnetyczne o dużej przewodności elektrycznej.

Z teoretycznego punktu widzenia skuteczność ekranowania zależy od zespołu własności fizycznych, geometrii ekranu oraz charakterystyki źródła promieniowania - w tym przede wszystkim od rodzaju materiału, z którego wykonany jest ekran, jego grubości oraz kształtu ekranu, wielkości osłanianego obiektu, częstotliwości pola, odległości od źródła, natężenia fali elektromagnetycznej padającej na ekran.

Z praktycznego punktu widzenia do ekranowania pól elektrycznych należy stosować materiały o dużej przewodności elektrycznej, natomiast do ekranowania pól magnetycznych materiały o dużej przenikalności magnetycznej. Ze wzrostem częstotliwości pola elektromagnetycznego maleje rola przenikalności magnetycznej w efektach tłumienia, a rośnie wpływ przenikalności elektrycznej. Przy dużych częstotliwościach własności magnetyczne materiału odgrywają drugorzędną rolę; eksponowane jest przewodnictwo elektryczne materiału. Z kolei przy dużych natężeniach pól i dla średnich częstotliwości należy stosować ekrany warstwowe zbudowane z ekranów o malejącej przenikalności i rosnącej przewodności w kierunku wnętrza ekranu.

Na podstawie wiedzy teoretycznej i praktycznej stwierdza się, że najtrudniejszym problemem jest ekranowanie pól magnetycznych i elektromagnetycznych o małej częstotliwości, gdyż w tym przypadku potrzebne są materiały o dużej przenikalności magnetycznej, małej pozostałości magnetycznej i koercji oraz małej magnetostrykcji, wymagana jest również duża grubość ekranu. Do ekranowania pól elektromagnetycznych o średniej częstotliwości potrzebne są materiały ferromagnetyczne o dużej konduktywności, a dla wysokich częstotliwości i pól elektrycznych wystarczy, by materiał na ekrany był przewodnikiem elektrycznym [3].

2.1. Materiały stosowane do ekranowania fal elektromagnetycznych

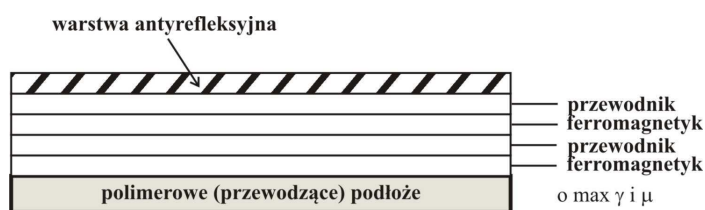
Szczególne zainteresowania badawcze skoncentrowane były i są na ekranach pól elektromagnetycznych wykonanych ze szkielek metalicznych magnetycznie miękkich, które posiadają bardzo dużą przenikalność magnetyczną, szczególnie przydatną do ekranowania składowej magnetycznej pola, małą magnetostrykcję a także charakteryzuje je duża wytrzymałość i wiotkość [5,6]. Zaletami takich materiałów są m.in. możliwość kształtowania ich własności fizycznych poprzez dobór składu chemicznego, obróbkę cieplną lub obróbkę cieplno - magnetyczną. Ponadto, przy formowaniu kształtu ekranu nie zmieniają się istotnie własności elektryczne i magnetyczne materiału, przez co nie zmienia się ich skuteczność ekranowania. Na zmianę skuteczności tłumienia ekranu wykonanego z taśm metalicznych nie wpływają także drgania obiektu ekranowanego lub też wielokrotne odkształcenia występujące w trakcie eksploatacji materiału. Dzięki wykorzystaniu szkielek metalicznych możliwe jest formowanie cienkich i pojedynczych ekranów o określonej skuteczności tłumienia, jak również wielowarstwowych o skuteczności ekranowania dostosowanej do charakterystyki ekranowanego pola. Z reguły wykorzystuje się szkła metaliczne o strukturze amorficznej, gdyż taśmy o strukturze nanokrystalicznej, pomimo lepszych własności magnetycznych i stosunkowo niskiej ceny, otrzymane w wyniku kontrolowanej obróbki cieplnej wykazują dużą kruchość, co w praktyce ogranicza ich zastosowanie w konstrukcji giętkich ekranów magnetycznych.

Przedmiotem intensywnych badań nad zastosowaniem jako elementy absorbujące fale elektromagnetyczne są polimery przewodzące tj. polianilina, polipirol, poliacyetylen, politiofen, polifenylene [7-9]. Podyktowane jest to znaczną przewodnością takich polimerów (rzędu 10 S/cm), której towarzyszy mały ciężar właściwy, lekkość, giętkość i możliwość formowania powierzchni ekranujących w złożone kształty. Polimery przewodzące bez domieszek są półprzewodnikami, dopiero odpowiednie domieszkowanie powoduje, że ich przewodnictwo wzrasta nawet o kilka rzędów wielkości. Bardzo cienkie próbki polimeru elektroprzewodzącego mają dużą, i co ważne, prawie niezależną od temperatury skuteczność ekranowania.

Coraz większe zainteresowanie (zgodnie z koncepcją zrównoważonego rozwoju) budzą również polimery biodegradowalne otrzymywane m.in. z biomasy np. lignoceluloza [10]. Polimery biodegradowalne należą do klasycznych termoplastów, które mogą być przetwarzane takimi samymi metodami, jak polimery niebiodegradowalne i nie stanowią takiego zagrożenia dla środowiska naturalnego. Wykazują dobre własności fizykomechaniczne oraz fizykochemiczne.

Przykładem materiałów, które charakteryzują się zjawiskiem wielokrotnego odbicia pola elektromagnetycznego są kompozyty zawierające napełniacze o dużej powierzchni właściwej. Mogą to być kompozyty polimerowe zawierające napełniacze elektroprzewodzące np. cząsteczki metalu (żelaza, niklu, kobaltu) czy włókna węglowe bądź włókna węglowe z dodatkiem nanocząstek metali. Ich podstawową zaletą jest mała masa, a także niski koszt, łatwe przetworstwo i odporność korozyjna. W przypadku kompozytów z napełniaczem skuteczność ekranowania pola elektromagnetycznego wzrasta wraz ze wzrostem zawartości napełniacza i ze wzrostem jego wydłużenia [11].

Klasyczne materiały metalowe i ich kompozyty stosowane do ekranowania pól elektromagnetycznych bardzo dobrze odbijają fale elektromagnetyczne, jednakże ich nie pochłaniają. Często również mają niskie własności antykorozyjne. Dlatego stosuje się specjalne kompozyty wielowarstwowe metal-polimer, które są lekkie, mają dobrą odporność korozyjną i bardzo dobrze pochłaniają fale elektromagnetyczne. Wykorzystuje się również nanorurki węglowe jako pochłaniacze fali oraz wypełnienia polimerowe bądź krzemionkowe [12].



Rysunek 1. Schemat wielowarstwowego układu metalowego
Figure 1. Scheme of the multilayer metal system

Układy metalowe wielo- i cienkowarstwowe stanowią specjalną grupę materiałów, które mogą z powodzeniem być stosowane do tłumienia fal elektromagnetycznych. Rozwój nowych technologii nakładania powłok takich, jak: metody elektrolityczne, metoda ALD (*Atomic Layer Deposition*) czy chemiczne (CVD), a także fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) umożliwił uzyskanie materiałów wielowarstwowych o coraz cieńszych warstwach, o grubościach rzędu kilku nanometrów. Materiały takie posiadają wiele interesujących magnetycznych, elektrycznych, mechanicznych oraz optycznych własności [13]. Idea

stosowania układów wielowarstwowych polega na tym, że stosuje się na przemian warstwy przewodzące prąd (np. miedź, srebro) oraz warstwy ferromagnetyczne (np. nikiel, żelazo) o grubościach mikro- i nanometrycznych oraz zróżnicowanej strukturze (rys. 1) [14].

W artykule przedstawiono wyniki badań obejmujące obserwacje struktur oraz wybrane własności układów wielowarstwowych wytworzonych dwoma metodami: PVD oraz elektrolizy.

3. Metodyka badań

Materiałem do badań była folia miedziana, na którą naniesiono naprzemiennie powłoki Fe/Cu za pomocą elektrolizy (w przypadku elektrolizy podłoże - folia miedziana - miało grubość 50 μm) oraz warstwy Ni/Cu używając metody PVD (folia miedziana w tym przypadku miała grubość 70 μm). Próbkki miały wymiary odpowiednio: 40 mm x 40 mm (PVD) i 50 mm x 50 mm (elektroliza).

Metodą PVD wytworzono cztery próbki o różnym czasie napyłania, pierwsze dwie próbki posiadały po 5 i 10 naprzemiennych warstw Ni/Cu (czas nanoszenia odpowiednio: 3 i 5 minut), kolejne, natomiast, posiadały analogiczną liczbę warstw, różniły się natomiast czasem nanoszenia, który wynosił 6 i 12 minut/warstwa.

Za pomocą elektrolizy wytworzono układy z powłokami Fe/Cu w ilości 30 warstw o następujących grubościach pojedynczej warstwy:

- 25 nm;
- 50 nm;
- 100 nm.

Obserwacje struktur otrzymanych układów przeprowadzono w skaningowym mikroskopie elektronowym ZEISS Supra 25.

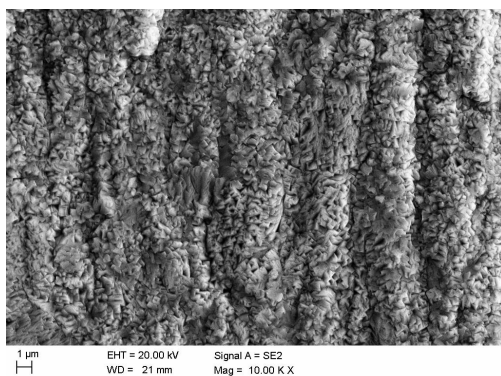
Następnie przeprowadzono badanie topografii powierzchni wielowarstwowych układów używając mikroskopu sił atomowych (AFM) XE – 100 firmy ParkSystems. Badaniu poddano próbki o wymiarach 120 mm x 120 mm. Badany obszar miał wymiary 25 μm x 25 μm .

Badania własności magnetycznych przeprowadzono w magnetometrze z wibrującą próbką (VSM – *Vibrating Sample Magnetometer*). Do badań przygotowano próbki Ni/Cu (5 warstw, czas napyłania 12 minut), Ni/Cu (10 warstw, czas napyłania 6 minut) oraz próbki Fe/Cu o grubości pojedynczej warstwy 50 nm i 100 nm. Badaniu poddano próbki o wymiarach 1 mm x 40 mm. Wyniki badań otrzymano w postaci pętli histerezy.

Badania rezystancji układów Fe/Cu i Ni/Cu przeprowadzono na autorskim stanowisku laboratoryjnym. Rezystancja została obliczona za pomocą oprogramowania DASYLab, które uwzględniało spadki napięcia podczas przeprowadzonego badania. Pomiar przeprowadzono w temperaturze $T = 21^{\circ}\text{C}$ (294 K).

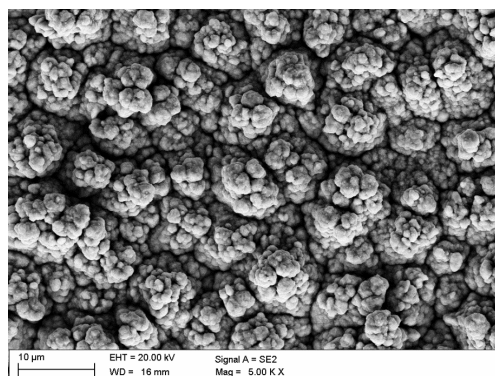
4. Wyniki badań i ich dyskusja

Rysunki 2-5 przedstawiają powierzchnie układów wielowarstwowych wytworzonych metodami elektrolizy i PVD obserwowanych w skaningowym mikroskopie elektronowym w różnych powiększeniach.



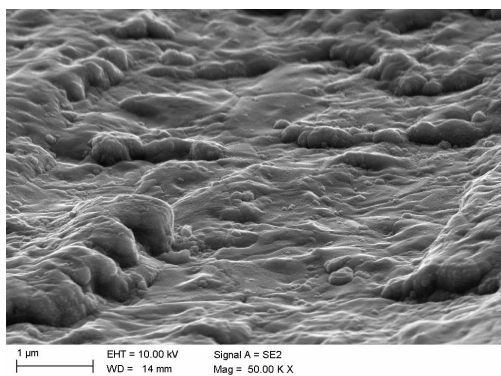
Rysunek 2. Powierzchnia powłoki Fe układu Fe/Cu o grubości 50 nm na folii miedzianej, 10000 x

Figure 2. Surface of Fe layer in the Fe/Cu system on the copper foil, a single layer thickness is 50 nm, 10000 x



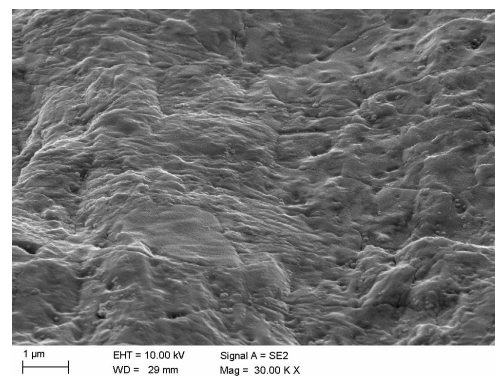
Rysunek 3. Powierzchnia powłoki Cu układu Fe/Cu na folii miedzianej, grubość pojedynczej warstwy 25 nm, 5000 x

Figure 3. Surface of Cu layer in the Fe/Cu system on the copper foil, a single layer thickness is 25 nm, 5000 x



Rysunek 4. Układ Ni/Cu (10 warstw), widoczna warstwa miedzi, 50000 x

Figure 4. Ni/Cu system (10 layers), the copper layer is visible, 50000 x



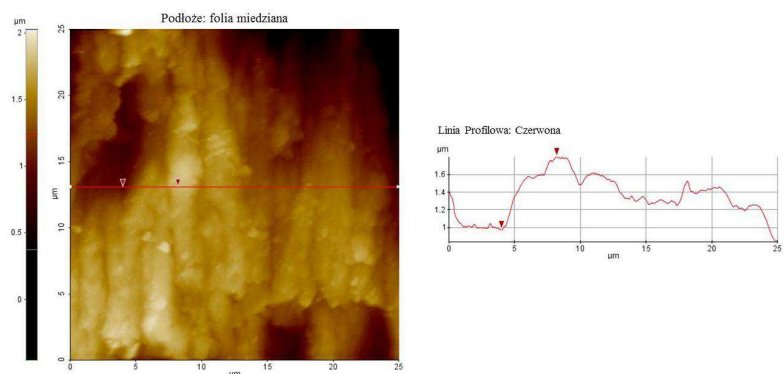
Rysunek 5. Układ Ni/Cu (5 warstw), widoczna warstwa miedzi, 30000 x

Figure 5. Ni/Cu system (5 layers), the copper layer is visible, 30000 x

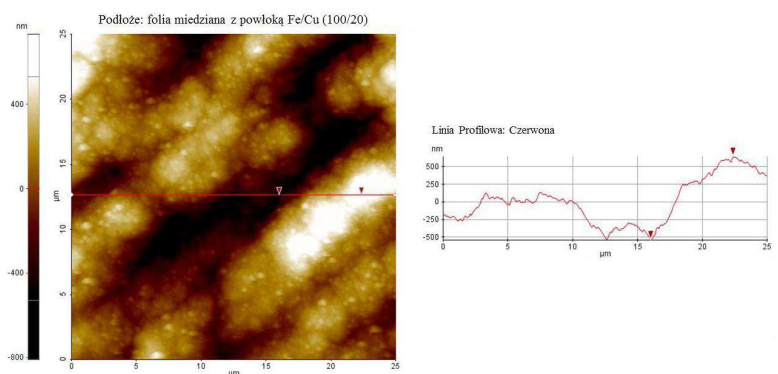
Po obserwacji powierzchni powłok w skaningowym mikroskopie elektronowym stwierdzono, że powłoki miedziana i żelazowa w układzie Fe/Cu naniesione za pomocą procesu elektrolizy są ciągłe i zwarte, przy czym należy nadmienić, że proces nakładania warstwy Fe był trudniejszy do realizacji. Powstające, w tym przypadku, zarodki krystalizacji bardzo wolno rozrastały się.

Analizując dalej otrzymane wyniki badań można stwierdzić, że powłoki układu Ni/Cu naniesione na folię miedzianą metodą PVD są ciągłe, jednorodne i charakteryzują się dobrą jakością.

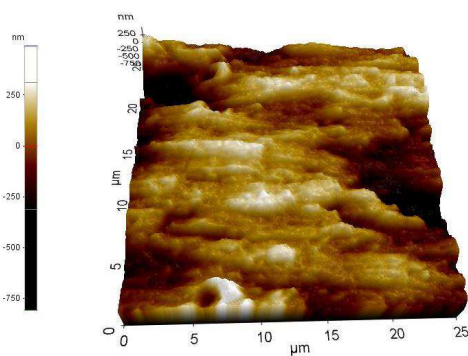
Wyniki obserwacji topografii powierzchni naniesionych warstw przeprowadzonych w mikroskopie sił atomowych (AFM) przedstawiono na rysunkach 6-9.



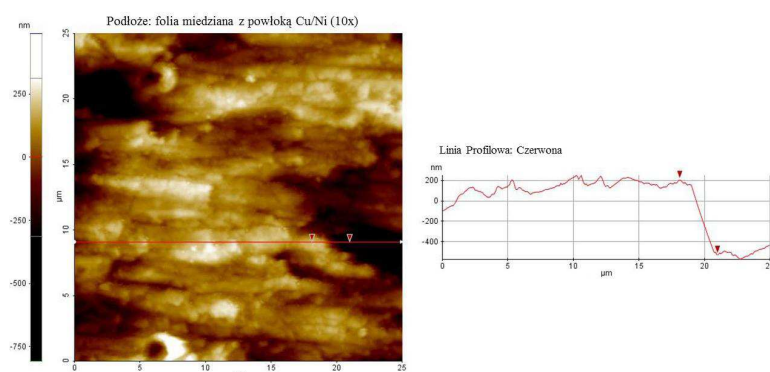
Rysunek 6. Linia profilowa z markerami dla podłoża próbki - folii miedzianej
 Figure 6. The profile line with markers for test sample – copper foil



Rysunek 7. Linia profilowa z markerami dla układu Fe/Cu – grubość pojedynczej warstwy 100 nm
 Figure 7. The profile line with markers for Fe/Cu system – a single layer thickness is 100 nm



Rysunek 8. Trójwymiarowa wizualizacja topografii próbki Ni/Cu – 10 warstw
 Figure 8. The tree-dimensional visualization of the Ni/Cu sample topography – 10 layers



Rysunek 9. Linia profilowa z markerami dla układu Ni/Cu – 10 warstw
 Figure 9. The profile line with markers for Ni/Cu system – 10 layers

Badanie topografii wielowarstwowych układów metalowych miało na celu obserwację nierówności (chropowatości) powierzchni powłok wytworzonych różnymi metodami. Otrzymane wyniki porównano z nierównościami występującymi w próbce bazowej – folii miedzianej.

Powierzchnia układów Ni/Cu charakteryzuje się chropowatością zawierającą się w przedziale ok. 800 nm. Zmniejszyła się ona w stosunku do podłoża, ale nierówności materiału podłoża nadal mają wyraźny wpływ na topografię otrzymanego układu. Natomiast powierzchnia układu Fe/Cu posiada większą chropowatość wynoszącą powyżej 1100 nm. Należy również nadmienić, że powierzchnia próbki Ni/Cu wizualnie prezentuje się lepiej niż powierzchnia układu Fe/Cu.

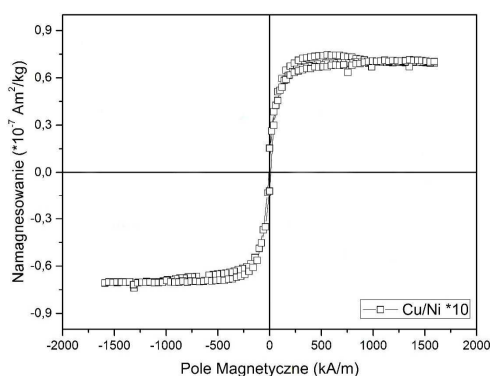
W magnetometrze z wibrującą próbką wykonano badania własności magnetycznych analizowanych układów. Badaniu poddano próbki Fe/Cu, gdzie grubość pojedynczej warstwy wynosiła: 50 nm i 100 nm oraz układy Ni/Cu dla odpowiednio 5 i 10 warstw. W tabeli 1 zestawiono masy próbek oraz założony zakres pola magnetycznego. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono otrzymane pętle histerezy dla wybranych dwóch układów.

Tabela 1. Waga próbek oraz zakres pola magnetycznego

Table 1. Weight of the samples and the range of magnetic field

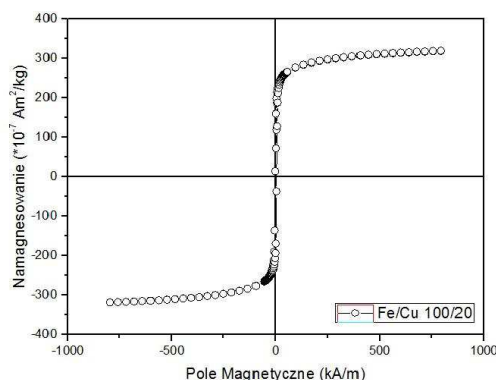
l.p.	Próbka	Masa, g	Zakres pola magnetycznego, Gs
1.	Ni/Cu x5	0,00905	Pomiar wykonany w zakresie: -20000 Gs - 20000 Gs
2.	Ni/Cu x10	0,0078	Pomiar wykonany w zakresie: -10000 Gs - 10000 Gs z zagęszczeniem w obszarze (-700 - 700 Gs)
3.	Fe/Cu 50 nm	0,0052	Pomiar wykonany w zakresie: -10000 Gs - 10000 Gs z zagęszczeniem w obszarze (-700 - 700 Gs)
4.	Fe/Cu 100 nm	0,0063	Pomiar wykonany w zakresie: -10000 Gs - 10000 Gs z zagęszczeniem w obszarze (-700 - 700 Gs)

Na podstawie kształtu otrzymanych pętli histerezy można wnioskować, że analizowane układy wielowarstwowe są ferromagnetykami magnetycznie miękkimi (pętle histerezy są bardzo wąskie). Uwzględniając otrzymane wyniki badań własności magnetycznych można stwierdzić, że obecna budowa układów zarówno Fe/Cu, jak i Ni/Cu nie pozwala na to, aby zaprojektowane ekrany skutecznie tłumiły pole elektromagnetyczne. Jednak, w celu dokładniejszej weryfikacji, należałoby przeprowadzić dalsze badania w tym kierunku.



Rysunek 10. Pętla histerezy dla układu Ni/Cu x10

Figure 10. The hysteresis loop for Ni/Cu x10 system



Rysunek 11. Pętla histerezy dla układu Fe/Cu 100 nm

Figure 11. The hysteresis loop for Fe/Cu 100 nm system

Kolejno, przeprowadzono również pomiar rezystancji przygotowanych próbek. Otrzymane wyniki badań zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów rezystancji układów

Table 2. Results of the system resistance measurements

Układ	Ni/Cu x5	Ni/Cu x10	Fe/Cu 50 nm	Fe/Cu 100 nm
Rezystancja, Ω	0,038	0,102	0,101	0,103

Należy zwrócić uwagę, że grubość układu Ni/Cu z 5 naprzemiennymi warstwami dwukrotnie przewyższa grubość 10 warstwowej próbki Ni/Cu (ze względu na dwukrotnie dłuższy czas nanoszenia powłok). W związku z tym, wynik pomiaru rezystancji dla układu Ni/Cu x5 jest mniejszy aniżeli dla układu Ni/Cu x10, gdzie warstwa miedzi jest cieńsza. W związku z tym próbka Ni/Cu x5 lepiej przewodzi prąd.

W przypadku dwóch próbek wytworzonych metodą elektrolizy, wyniki pomiaru rezystancji są bardzo zbliżone. Najprawdopodobniej wynika to z bardzo niewielkich różnic w grubościach poszczególnych warstw: Fe/Cu 50 nm i Fe/Cu 100 nm. Opór elektryczny osiągnął w tym przypadku stosunkowo duże wartości (około 0,1 Ω). Na takie wyniki mogły mieć wpływ zanieczyszczenia i występowanie efektu naskórkowości.

5. Podsumowanie

Proces PVD jest techniką bardzo dokładną, dlatego też tą metodą można nakładać powłoki o niewielkich grubościach, przy zachowaniu wysokiej jakości, znacznie wyższej, niż w przypadku warstw naniesionych elektrolitycznie. Niemniej jednak, uwzględniając także badania topografii powierzchni próbek można stwierdzić, że powłoki wytworzone obiema wybranymi metodami są zwarte, o chropowatości zbliżonej do chropowatości podłoża, czyli folii miedzianej.

Uwzględniając wyniki pomiaru rezystancji układów Ni/Cu i Fe/Cu, a także badań własności magnetycznych można wnioskować, że układy te wymagają jeszcze badań

i udoskonaleni, aby mogly byc z powodzeniem stosowane do ekranowania promieniowania elektromagnetycznego w szerokim zakresie czestotliwosci.

LITERATURA

1. J. Marciniak, R. Nowosielski, Ochrona naturalnego srodowiska elektromagnetycznego czlowieka, *Przeglad Mechaniczny* 9 (1988) 14-26.
2. R. Sikora, *Teoria pola elektromagnetycznego*, WNT, Warszawa, 1998.
3. J. Marciniak, *Zagrozenie naturalnego srodowiska elektromagnetycznego*, Wyd. Politechniki Slaskiej, Gliwice, 2000.
4. K. Gryz, J. Karpowicz, *Pola elektromagnetyczne w srodowisku pracy*, CIOP, Warszawa, 2000.
5. R. Nowosielski, S. Griner, Tlumienie pol elektromagnetycznych przez ekrany ze szkla metalicznego $Co_{70,5}Fe_{2,5}Mn_2Mo_1Si_9B_{15}$, *Proceedings of 10th Scientific International Conference "Achievements in Mechanical and Materials Engineering" AMME'01*, Gliwice - Zakopane, 2001, 383-386.
6. R. Nowosielski, S. Griner, Tlumienie pol elektromagnetycznych przez ekrany warstwowe hybrydowe ze szkieł metalicznych na osnowie zelaza i kobaltu, *Proceedings of 11th Scientific International Conference "Achievements in Mechanical and Materials Engineering" AMME'02*, Gliwice - Zakopane, 2002, 369-374.
7. B.R. Kim, H.K. Lee, E. Kim, S.H. Lee, Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films, *Synthetic Metals* 160 (2010) 1838-1842.
8. D. Yuping, L. Shunhua, G. Hongtao, Investigation of electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of polyaniline composite, *Science and Technology of Advanced Materials* 6 (2005) 513-518.
9. J. Joo, C.Y. Lee, High frequency electromagnetic interference shielding response of mixtures and multilayer films based on conducting polymers, *Journal of Applied Physics* 88 (2000) 513-518.
10. K.G. Satyanarayana, G.C. Arizaga, F. Wypych, Biodegradable composites based on lignocellulose fibers - an overview, *Progress in Polymer Science* 34 (2009) 982-1021.
11. M. Jalali, S. Dauterstedt, A. Michaud, R. Wuthrich, Electromagnetic shielding of polymer-matrix composites with metallic nanoparticles, *Composites: Part B* 42 (2011) 1420-1426.
12. M. Chen, Y. Zhu, Y. Pan, H. Kou, H. Xu, J. Guo, Gradient multilayer structural design of CNTs/SiO₂ composites for improving microwave absorbing properties, *Materials and Design* 32 (2011) 3013-3016.
13. B. Kucharska, E. Kulej, A. Wróbel, Thermal stability of the Cu/Ni multilayer system in X - Ray diffraction and scanning microscope examinations, *Optica Applicata*, vol. XLII, 4 (2012) 725-736.
14. L. Zhichao, Z. Qiang, M. Xiangyu, W. Gaohui, Microstructure evolution process of ferro-aluminum based sandwich composite for electromagnetic shielding, *Micron* 64 (2014) 34-38.