

Detekcja defektów cienkich struktur elektroprzewodzących z wykorzystaniem termografii

Streszczenie. W artykule zaprezentowano metodę wykrywania defektów warstw cienkich elektroprzewodzących powstałych w procesie ich wytwarzania lub użytkowania za pośrednictwem analizy zdjęć termograficznych. Warstwy te zostały wytworzone na elastycznym podłożu kompozytowym z wykorzystaniem technologii osadzania próżniowego PVD. W wyniku przepływu prądu elektrycznego przez próbki, dochodzi do ich nierównomiernego nagrzewania, a to stanowi podstawę do detekcji niejednorodności struktur w analizie termograficznej.

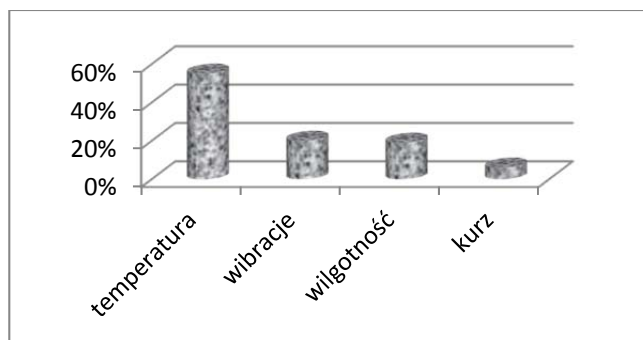
Abstract. The paper presents a method for detecting defects of thin electroconductive layers formed during their manufacturing or using via thermographic images analysis. These layers are formed on a flexible composite substrate with using vacuum deposition PVD technology. As a result of the electric current flow through the samples it comes to the uneven heating, and this is the basis for detection of inhomogeneity in structures via thermographic analysis. (*Defect detection in electroconductive thin layers via thermography method*).

Słowa kluczowe: termografia, próżniowe nanoszenie cienkich warstw, PVD, cienkie warstwy elektroprzewodzące.

Keywords: thermography, vacuum deposition of thin layers, PVD, electroconductive thin layers.

Wstęp

Temperatura jest jednym z najbardziej miarodajnych wskaźników poprawności działania układów elektrycznych lub elektronicznych. Ulegające degradacji połączenia elektryczne, uszkodzone elementy układów, defekty w strukturach elektronicznych mogą powodować zaburzony lub nierównomierny rozkład temperatury. Jej pomiar w czasie rzeczywistym w bezkontaktowy sposób możliwy jest dzięki zastosowaniu coraz częściej wykorzystywanego narzędzia służącego do monitorowania stanu urządzeń jakim jest termografia w podczerwieni (IRT) [1]. IRT pozwala na wczesne wykrycie wad sprzętu oraz wadliwych procesów przemysłowych i instalacji elektrycznych w trakcie ich eksploatacji. [2]



Rys.1. Procentowy udział czynników środowiskowych w uszkodzeniach układów elektronicznych. [3]

W tym aspekcie niezmiernie ważna jest ocena nagrzewania się cienkich struktur elektroprzewodzących znajdujących zastosowanie między innymi w tekstronice czy też elektronice elastycznej. Bieżące tendencje do miniaturyzacji układów elektronicznych wskazują na celowość badań zmierzających do ich integracji między innymi z odzieżą [4-6]. Ważne są badania w zakresie uzyskania cienkich struktur elektroprzewodzących o stałych i stabilnych parametrach elektrycznych, a także dotyczące możliwości zaimplementowania źródeł energii odnawialnej do układów stosowanych w elektronice elastycznej [7].

Metoda wytwarzania cienkich warstw

Badaniom zostały poddane cienkie warstwy przewodzące prąd elektryczny wytworzone w procesie osadzania próżniowego. Proces wytwarzania warstw z

wykorzystaniem stanowiska próżniowego Classic 250 Pfeiffer Vacuum przeprowadzono w Instytucie Systemów Inżynierii Elektrycznej Politechniki Łódzkiej. Materiałem podłożowym dla warstw przewodzących był kompozyt tekstylny (Cordura) zbudowany z nici nylonowych z pokryciem z folii poliuretanowej. Materiałem nanoszonym było srebro o czystości 99,99%. W trakcie procesu technologicznego ciśnienie zmieniało się w zakresie 0.01 Pa (1.0×10^{-4} mbar) do 0.1 Pa (1.0×10^{-3} mbar) Czas nanoszenia warstwy metalicznej wynosił 5 min.

W procesie nanoszenia warstw otrzymano próbki przedstawione na zdjęciu 2.



Rys.2. Elektroda wytworzona w procesie nanoszenia próżniowego.

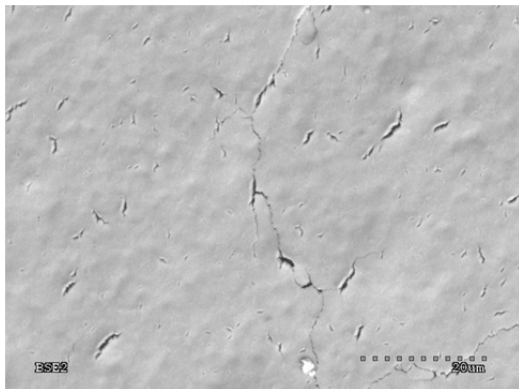
Wyniki badań termograficznych

Jedną z podstawowych metod oceny jakości wytworzonych struktur jest mikroskopia skaningowa [8,9]. Przed przystąpieniem do badań termograficznych dokonano wstępnej oceny jakości wytworzonej warstwy elektroprzewodzącej z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego SEM Hitachi S-4200. Obrazy mikroskopowe (SEM) przy powiększeniach 1500x oraz 2500x zostały zaprezentowane na rysunku 3.

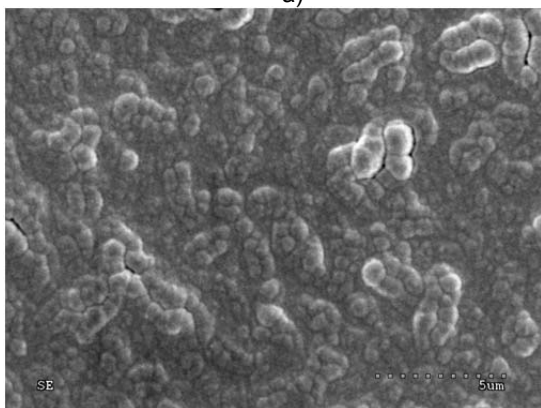
Z analizy zdjęć mikroskopowych wynika, że wytworzona warstwa cechuje się licznymi mikropęknięciami, możliwymi do obserwacji jedynie z użyciem mikroskopii skaningowej przy dużych powiększeniach. Pęknięcia te mają niewątpliwie wpływ na własności elektroprzewodzące wytworzonych ścieżek. Jednakże ocena jakości wykonanych struktur na podstawie zdjęć mikroskopowych jest ekonomicznie nieuzasadniona. Ponadto jest to metoda pokazująca ogólnie jakość naniesionej warstwy. Natomiast stwierdzenie niejednorodności struktury czy też występowania defektów na podstawie obrazów mikroskopowych jest mocno utrudnione ze względu na ograniczoną wielkość próbek przygotowanych do obserwacji.

Ze względu na fakt, że obrazy mikroskopowe obejmują niewielki obszar wytworzonych struktur i nie dają podstaw do wyciągnięcia wniosków o całej warstwie, wytworzone

próbki zostały poddane badaniom termograficznym. Ustalony stan termiczny próbek uzyskano poprzez przepływ prądu stałego o wartości 200mA przez 10 minut. Obrazy termograficzne wykonano z wykorzystaniem kamery termowizyjnej FLIR T650sc, będącej na wyposażeniu Wojskowego Instytutu Medycznego w Warszawie.



a)

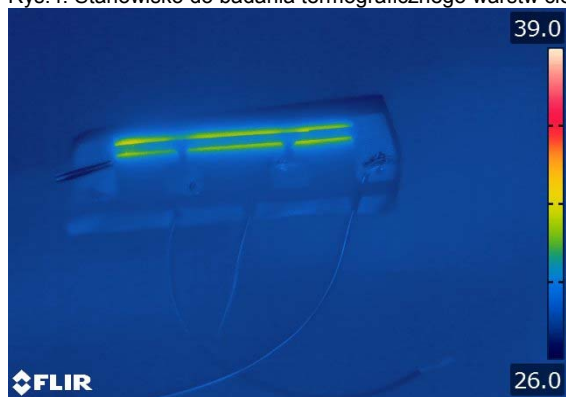


b)

Rys.3. Obraz mikroskopowy wykonany z użyciem mikroskopu skaningowego przedstawiający ciekłą warstwę Ag wykonaną metodą nanoszenia próżniowego na kompozyt elastyczny wykonany z nici nylonowych z pokryciem z folii poliuretanowej, z zachowaniem ciągłości warstwy elektroprowadzącej, przy powiększeniu: a) 1500x, b) 2500x



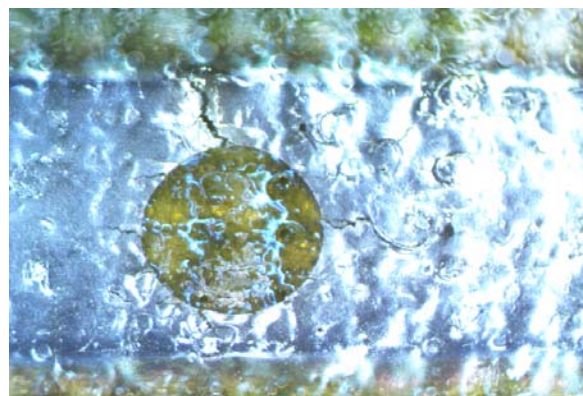
Rys.4. Stanowisko do badania termograficznego warstw cienkich.



Rys.5. Termogram homogenicznej struktury Ag wykonanej na elastycznym kompozytowym podłożu.

Z rysunku 5 wynika, że struktura srebrna nagrzewa się w sposób równomierny, zatem na danej próbce nie stwierdzono występowania defektów czy też niejednorodności warstwy. Jest to sytuacja pożądana, ale przy rzeczywistym użytkowaniu często dochodzi do zniszczenia struktury a co najmniej jej częściowych uszkodzeń. W celu przeprowadzenia identyfikacji defektów wytworzonych struktur, na kilku próbkach celowo zostały wykonane uszkodzenia warstwy metalicznej z wykorzystaniem ablacji laserowej.

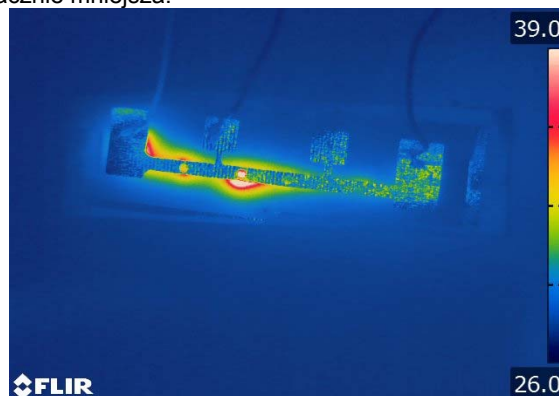
Efekt tego procesu został przedstawiony na rys. 6. Zdjęcie mikroskopowe zostało wykonane przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Delta Optical SZ-630T przy powiększeniu 20x.



Rys.6. Zdjęcia mikroskopowe uszkodzenia struktury metalicznej wykonane w drodze ablacji laserowej. (powiększenie 20x)

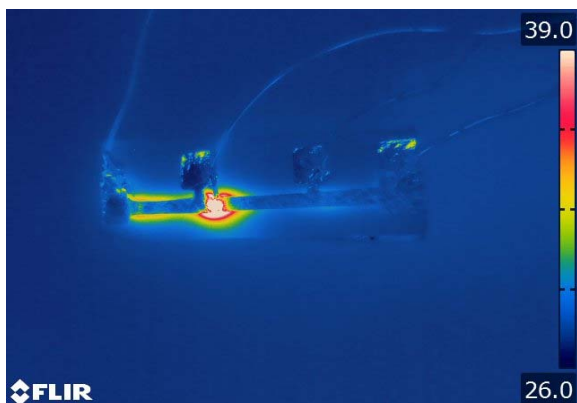
W wyniku przepuszczenia przez zdeformowaną próbkę prądu o wartości 200 mA, po ustalonym czasie 10 minut zostały wykonane kolejne zdjęcia termograficzne. Na obrazach termograficznych (rys.7) można wyraźnie zaobserwować obszary o podwyższonej temperaturze, co potwierdza nierównomierne nagrzewanie się próbki zawierającej defekty. Obszary te znajdują się dokładnie w miejscach laserowo wykonanych przewężeń struktury. Miejsca te ze względu na inną wartość rezystancji obszaru nagrzewają się do wyższej temperatury.

Obszar o podwyższonej rezystywności został wytworzony również w procesie nanoszenia warstwy. W tym przypadku podłoże zostało częściowo przesłonięte, a tym samym grubość naniesionej warstwy elektroprowadzącej jest w jednym fragmencie próbki znacznie mniejsza.



Rys.7. Termogram struktury zdefektowanej w wyniku celowej ablacji laserowej.

Obecności takiego obszaru nie można stwierdzić na podstawie badań mikroskopowych. Wnioski na temat istnienia niejednorodności struktury i miejsca jej występowania można wyciągnąć natomiast na podstawie obrazu termograficznego zaprezentowanego na rysunku 8.



Rys.8. Termogram elektroprowadzącej struktury cienkowarstwowej z niejednorodną grubością warstwy.

Podsumowanie

W prezentowanej pracy autorzy proponują wykorzystanie termografii jako metody oceny jakości wytworzonych struktur cienkowarstwowych na podłożach elastycznych. Ze względu na grubości wytworzonych warstw rzędu kilkuset nanometrów [6], a tym samym ryzyko ich uszkodzenia przy pomiarach realizowanych metodami kontaktowymi, użycie nieingerencyjnych metod pomiarowych jest ze wszech miar wskazane. Termowizyjna metoda identyfikacji uszkodzeń struktury ma ponadto przewagę nad pomiarami kontaktowymi polegającą na możliwości detekcji uszkodzeń na całej powierzchni struktury, a nie tylko na jej wybranym obszarze. Liczba punktów pomiaru i ich rozdzielczość w pomiarze termowizyjnym znacznie przewyższają możliwości wielopunktowego pomiaru kontaktowego.

Optyczna metoda wykrywania usterek (np. z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej) umożliwia jedynie wstępną ocenę jakości struktury w przypadku występowania wady w postaci pęknięcia bądź wyraźnej nierównomierności. Nie jest możliwa wymierna ocena wpływu takiej wady na parametry elektryczne struktury. Niedoskonałość takiej metody polega także na poddaniu ocenie jedynie powierzchni struktury bez możliwości oceny zmian jej grubości lub wad występujących pod powierzchnią. Wady struktury występujące w dowolnym obszarze mają bezpośredni wpływ na rezystancję lokalną, a tym samym na emisję ciepła wydzielanego w trakcie przesyłu sygnału. Analiza rozkładu emisji ciepła odzwierciedlona na obrazie termowizyjnym pozwoli więc na identyfikację obszarów niejednorodności ścieżki elektroprowadzącej.

Wyniki badań termowizyjnych mogą być opracowywane z uwzględnieniem różnych algorytmów [10-13], a dane przetwarzane z ich pomocą mogą być następnie przechowywane w strukturach relacyjno-hierarchicznych [14].

Autorzy: dr inż. Ewa Korzeniewska, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: ewa.korzeniewska@p.lodz.pl; dr inż. Piotr Murawski, Wojskowy Instytut Medyczny, Szaserów 123, 04-141 Warszawa, e-mail: pmurawski@wim.mil.pl; prof. dr hab. inż. Andrzej Krawczyk, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: ankra.new@gmail.com; dr hab. inż. Ryszard Pawlak prof. PŁ Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: ryszard.pawlak@p.lodz.pl

LITERATURA

- [1] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, John Philip, T. Jayakumar "Infrared thermography for condition monitoring – A review" *Infrared Physics & Technology* 60 (2013) 35–55
- [2] R. Kafieh, T. Lotfi, Rassoul Amirfattahi "Automatic detection of defects on polyethylene pipe welding using thermal infrared imaging" *Infrared Physics & Technology* 54 (2011) 317–325
- [3] M. Janicki, A. Napieralski „Modelling electronic circuit radiation cooling using analytical thermal model" *Microelectronics Journal* 31 (2000) 781–785
- [4] E Korzeniewska, A Duraj, C. Koneczny, A Krawczyk "Thin film electrodes as elements of telemedicine systems" *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* Vol. 2014, Nr. 12
- [5] E. Korzeniewska, A. Duraj, A. Krawczyk „Identyfikacja wyjątków sensorycznych funkcji organizmu przy zastosowaniu nowoczesnej metody monitoringu e-włókien”, *Przegląd Elektrotechniczny* (2013) vol. 89, No.12, pp. 123-127
- [6] Szczęsny A. "Przydatność elektronicznych przekładników prądowych przy pracy w podwyższonej temperaturze" *Przegląd Elektrotechniczny* (2011), nr 11, str 9-12
- [7] Matuszczyk P. Popławski T. Flaszka J., „Potencjał i możliwości energii promieniowania elektromagnetycznego Stońca" *Przegląd Elektrotechniczny* (2015), nr 1, str 183-187
- [8] R. Pawlak, E. Korzeniewska, M. Frydrysiak, J. Zięba, Ł. Tęśiorowski, K. Gniotek, Z. Stempień, M. Tokarska „Using Vacuum Deposition Technology for the Manufacturing of Electro-Conductive Layers on the Surface of Textiles" *Fibres Issue* 2 (91) / 2012 , pages 68–72
- [9] Rogowski J., Kubiak A., "Effects of annealing temperature on the structure and electrical properties of tungsten contacts to n-type silicon carbide" *Materials Science and Engineering B* 191 (2015) 57–65
- [10] Byczkowska-Lipińska L., Wosiak A., Multimedia NoSQL database solutions in the medical imaging data analysis, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 12, 2013, p.234-237
- [11] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Efficiency and economic aspects in electromagnetic and optimization calculations of electrical systems, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 12, 2010, p. 57-60
- [12] Kasprzyk L., Bednarek K., Speeding up of electromagnetic and optimization calculations by the use of the parallel algorithms, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 12, 2009, p. 65-68
- [13] Drzymała P., Welfle H., Szacowanie strat dodatkowych w uzwojeniach transformatorów z wykorzystaniem numerycznych metod polowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 1, 2015, p. 133-135
- [14] Drzymała P., Welfle H., DB2 pureXML - zaawansowanie składowanie danych w strukturach relacyjno-hierarchicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, No 3, 2014, p. 165-168