

Dokładność czujników indukcyjnych w defektoskopii warstw ochronnych urządzeń elektrycznych

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki badań czujnika elektromagnetycznego indukcyjnego, który będzie w stanie wykryć i zlokalizować wady oraz ich występowanie w badanych powłokach ochronnych. Dla wybranych rodzajów sygnałów przeprowadzono szereg pomiarów dobierając częstotliwość i amplitudę oraz określając dokładność czujnika indukcyjnego. Grubość warstwy ochronnej określono przy pomocy dokładnych przyrządów znanej firmy Fischer.

Abstract: Article presents results of research of an electromagnetic induction sensor, which is able to detect and locate defects and their existence in tested protective coatings. For some types of signals, conducted a series of measurements by choosing the frequency, amplitude and specifying accuracy of inductive sensor. Thickness of protective layer were determined by accurate instruments known brand Fischer. (**Accuracy of inductive sensors in flaw detection of protective layers of electrical equipment**)

Słowa kluczowe: czujnik indukcyjny, defektoskopia warstw ochronnych

Keywords: inductive sensor, flaw detection protective layers

doi:10.12915/pe.2014.12.70

Wstęp

Powłoka to warstwa materiału, wytworzona naturalnie lub nałożona na powierzchnię przedmiotu, wykonanego z innego materiału, w celu uzyskania wymaganych własności technicznych lub dekoracyjnych. Powłoki nakładane w celach ochronnych czy ozdobnych powinny spełniać określone parametry dotyczące ich wyglądu, jakości, grubości, wytrzymałości itp. [1].

W trakcie eksploatacji powierzchnia zewnętrzna konstrukcji i elementów urządzeń elektroenergetycznych ulega zużyciu. Powodem tego jest najczęściej działanie czynników zewnętrznych – mechanicznych, cieplnych, chemicznych, elektrycznych czy elektrochemicznych. W warunkach rzeczywistych jest to wynikiem oddziaływania wielu czynników jednocześnie. Znalezienie dominującego oddziaływania pozwala zastosować odpowiednie zabezpieczenie [2].

Pomiary grubości warstw wierzchnich i powłok stosuje się w różnorodnych gałęziach przemysłu: w przemyśle samochodowym, spożywczym, elektrotechnicznym i elektronicznym, lotniczym, metalowym, komputerowym, telekomunikacyjnym i w przemyśle tworzyw sztucznych. Zastosowanie coraz doskonalszych zabezpieczeń antykorozyjnych znacząco nie zmniejsza ubytków spowodowanych korozją, które są najczęściej główną przyczyną uszkodzeń lub pogarszania parametrów eksploatacyjnych wielu konstrukcji, urządzeń i instalacji.

Badanie powłok ochronnych cynkowych

Powłoka cynkowa jest jedną z najczęściej stosowanych w przemyśle powłok metalowych. Charakteryzuje się najlepszymi właściwościami w porównaniu do stalowych i żelaznych, zarówno jeśli chodzi o koszty jak i biorąc pod uwagę własności ochronne i grubość warstwy ochronnej. Jedną z najczęściej stosowanych metod jest metoda cynkowania ogniowego. W normie PN-EN ISO 1461:2000 określono wymagania, które powinna ona spełniać. Według normy ich grubość jest uzależniona od grubości i rodzaju materiału podłoża. Punktowa grubość warstwy tworzącej powłokę powinna wynosić nie mniej niż 35 μm . Maksymalna zaś nie jest określona o ile nie wpływa to na zastosowanie przedmiotu pokrytego warstwą ochronną [3]. Trwałość powłoki cynkowej uzależniona jest od warunków w jakich będzie eksploatowana oraz od jej grubości. Podstawowe badania przeprowadza się na podstawie oględzin oraz z zastosowaniem elektronicznego warstwomierza służącego do badania grubości powłok [4,5].

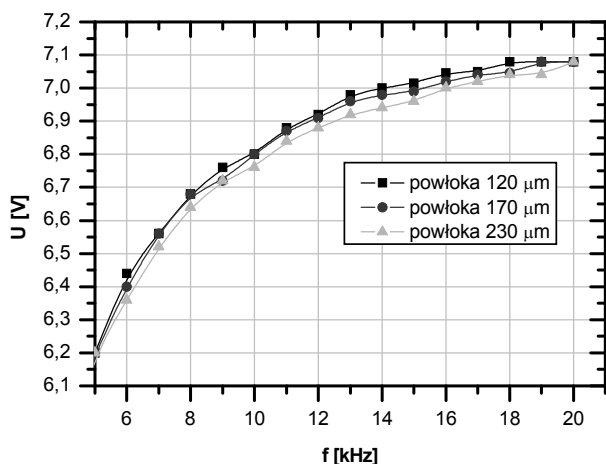
W tabeli 1 podano zgodnie z normą minimalne miejscowe i minimalne średnie grubości powłok uzależnionych od grubości zabezpieczanych elementów.

Tabela 1. Zależność grubości powłok cynkowych od grubości pokrywanych elementów według PN-EN ISO 1461:2000

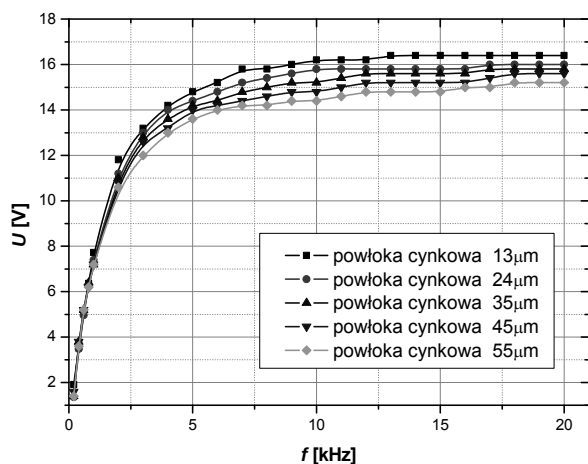
Grupa wyrobów	Grubość średnia powłoki w μm , (wartość minimalna)	Masa powłoki w g/m^2 odniesiona do średniej grubości	Grubość miejscowa powłoki w μm (wartość minimalna)
Części stalowe o grubości < 1,5 mm	45	325	35
Części stalowe o grubości $\geq 1,5 \text{ mm}$ do < 3 mm	55	395	45
Części stalowe o grubości $\geq 3 \text{ mm}$ do < 6 mm	70	505	55
Części stalowe o grubości $\geq 6 \text{ mm}$	85	610	70
Odlewy żeliwne $\geq 6 \text{ mm}$	80	575	70
Odlewy żeliwne < 6 mm	70	505	60

Do badania wykorzystano próbki, w których to na podłożu z blachy stalowej naniesiono warstwę cynku. Pomiary wykonano za pomocą indukcyjnego czujnika transformatorowego [6]. Pomiary grubości warstw wierzchnich przy pomocy czujników indukcyjnościowych dokonuje się zazwyczaj po ich wcześniejszym wywzorcowaniu i przygotowaniu do pomiarów. Umożliwia to zwiększenie dokładności pomiaru i sprawdzenie, czy zastosowany czujnik jest sprawny a jego wskazania właściwe do mierzonej powłoki. Przed wykonaniem badania grubości warstwy wierzchniej oprócz wzorcowania należy sprawdzić czystość powierzchni badanego elementu oraz wzorców i w razie potrzeby usunąć wszelkie zanieczyszczenia bez naruszania materiału powłoki.

Przetwornik transformatorowy zbudowany jest z dwóch uzwojeń nawiniętych na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym, stanowiąc transformator prądowy o otwartym obwodzie magnetycznym. Jest on wzbudzany zmiennym polem o częstotliwości od kilkuset do kilkunastu tysięcy Hz, wytwarzanym przez prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym zasilanym z regulowanego i stabilizowanego generatora sinusoidalnego [7,8,9]. Obwód magnetyczny przetwornika stanowi badana powłoka i podłoże. Powłoka stanowi „szczelinę” w obwodzie magnetycznym. Na rysunku 1 i 2 przedstawiono wyniki pomiarów powłoki cynkowej o zmiennej grubości naniesionej na podłoże stalowe pokryte warstwą cynku o stałej grubości.



Rys. 1. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału czujnika indukcyjnego dla różnych częstotliwości



Rys. 2. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału czujnika indukcyjnego dla różnych częstotliwości badanych powłok cynkowych

Dla częstotliwości sygnału pomiarowego sinusoidalnego w przedziale od 7 kHz do 17 kHz stwierdzono największą czułość na zmiany grubości powłoki lakierniczej. Dla częstotliwości mniejszych i większych od podanego powyżej przedziału pomiarowego wyniki pomiarów poszczególnych powłok są słabo rozróżnialne, gdyż mają zbliżoną wartość amplitudy sygnału pomiarowego.

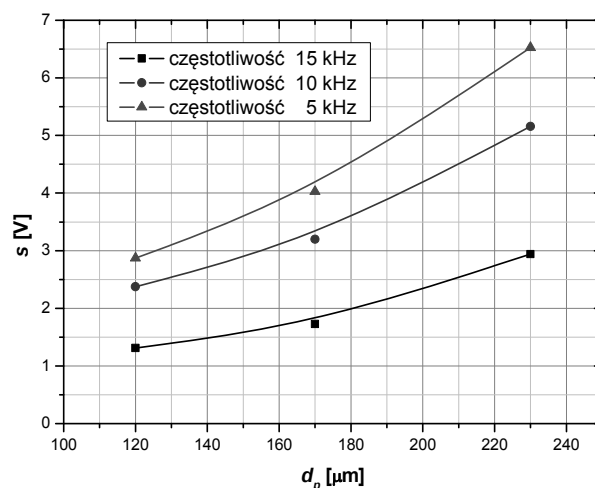
Pomiary wielokrotne na określonym obszarze badanego elementu pozwalają sprawdzić powtarzalność wskazań przyrządu oraz grubość powłoki na badanym obszarze. W przypadku gdy powierzchnia badanej próbki jest chropowata lub wiadomo, że powłoka posiada różną grubość, wielokrotne powtarzanie pomiaru w różnych punktach pozwala wyeliminować rozbieżności wyników pomiarów

Podczas pomiarów istnieje wiele czynników zakłócających mających istotny wpływ na wyniki badań wśród których można wymienić [10,11]:

- wpływ promienia krzywizny podłoża,
- wpływ zmian prądu magnesowania,
- wpływ przenikalności magnetycznej podłoża,
- wpływ przewodności elektrycznej właściwej powłoki i podłoża,
- wpływ efektu brzegowego i pola powierzchni,
- wpływ grubości podłoża,
- wpływ chropowatości powierzchni.

Stosując metody statystyczne dokonano oceny dokładności pomiaru czujnikiem indukcyjnym wykonując serie pomiarów w wyznaczonych miejscach na

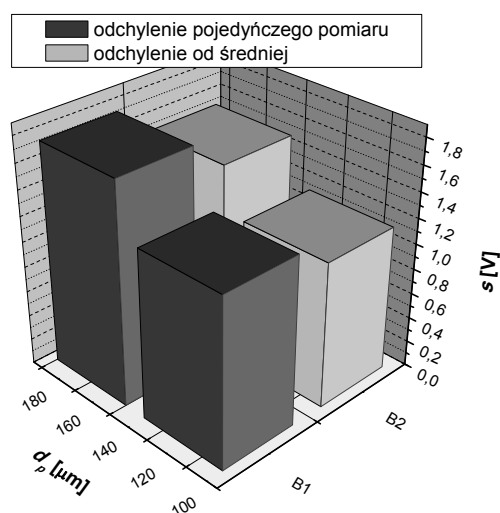
przygotowanych wcześniej trzech próbkach powłok ochronnych: 120 μm, 170 μm i 230 μm. Otrzymane wyniki analizy dokładności pomiaru przedstawiono na rysunku 3 [8,9,10,11].



Rys. 3. Wyniki analizy dokładności pomiaru czujnikiem indukcyjnym

Przedstawione na rysunku 3 wartości odchylenia standardowych pokazują proporcjonalnie większe wartości dla wzrastającej grubości badanej powłoki. Dla częstotliwości 15 kHz wartość odchylenia standardowego pojedynczego pomiaru wzrasta najmniej przy zwiększaniu się grubości badanej warstwy cynkowej. Związane jest to z głębokością wnikania sygnału pomiarowego do wnętrza badanej powierzchni.

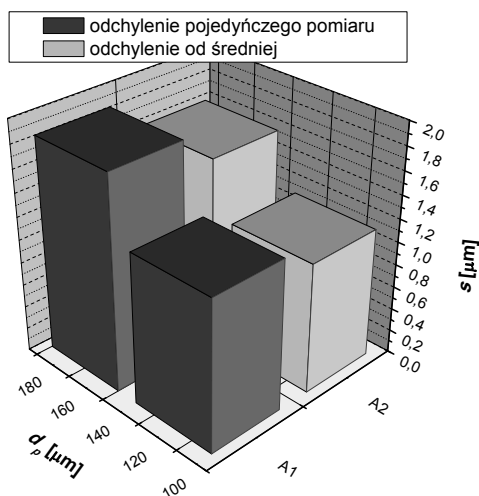
Dla dwóch badanych powłok ochronnych 120 μm i 170 μm przeprowadzono badania porównawcze wyznaczonej wartości odchylenia standardowego pojedynczego pomiaru i wartości odchylenia standardowego od średniej. Wyniki zaprezentowano na rysunku 4 dla wartości odchylenia standardowego w woltach i na rysunku 5 dla wartości odchylenia standardowego w mikrometrach.



Rys. 4. Wartości odchylenia standardowego w woltach dla pomiaru dokonanego za pomocą czujnika indukcyjnego

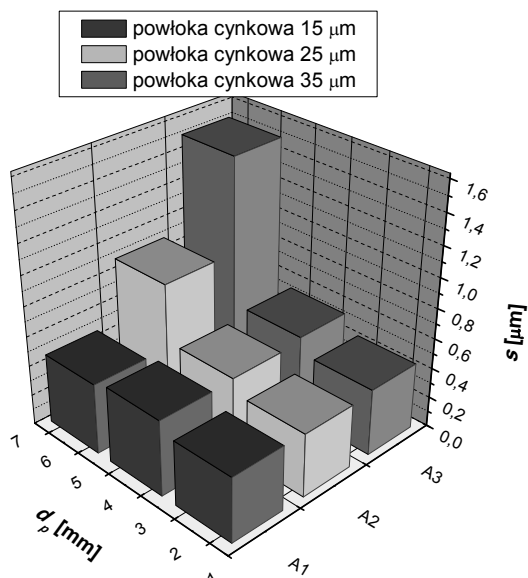
Dla czujnika indukcyjnego wartość odchylenia standardowego uległa zwiększeniu w przypadku drugiej badanej powłoki o grubości 170 μm. Związane jest m.in. z budową głowicy czujnika indukcyjnego, który uśrednia wyniki pomiarowe na powierzchni badanej o średnicy

równej średnicy powierzchni pomiarowej czujnika. Dla obydwu powłok wartość odchylenia standardowego pojedynczego pomiaru jest większa niż w przypadku odchylenia standardowego od średniej z pomiarów.



Rys. 5. Wartości odchylenia standardowego w mikrometrach dla pomiaru dokonanego za pomocą czujnika indukcyjnego

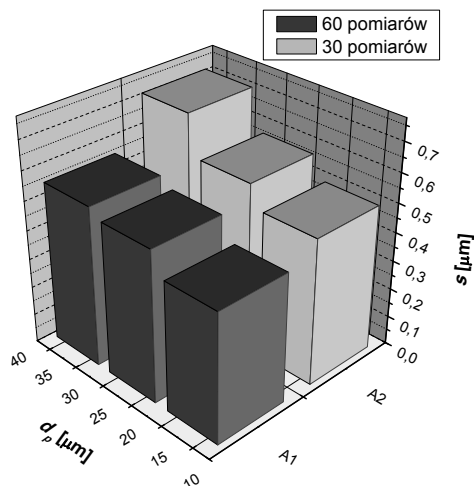
Badania przeprowadzono także dla trzech grubości podłoża stalowego o wartościach 2 μm , 4 μm i 6 μm , w celu sprawdzenia wpływu grubości podłoża stalowego na dokładność pomiaru ochronnej warstwy cynkowej. Jako warstwy wierzchniej użyto powłoki cynkowej o trzech wybranych grubościach 15 μm , 25 μm i 35 μm . Dla każdej grubości powłoki wykonano serię 30 pomiarów w różnych punktach badanej próbki, a następnie wyznaczono odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru. Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 6, gdzie s jest to odchylenie standardowe pojedynczego pomiaru a d_p jest to grubość stalowego podłoża, na którym naniesiono badane warstwy ochronne.



Rys. 6. Wyniki pomiarów czujnikiem indukcyjnym dla powłok cynkowych przy zmiennej wartości grubości podłoża stalowego

Dla oszacowania w jaki sposób wpływa na dokładność liczba pomiarów wykonanych na badanej próbce dla trzech wybranych grubości warstwy cynkowej 15 μm , 25 μm i 35 μm wykonano serię 30 oraz serię 60 pomiarów dla

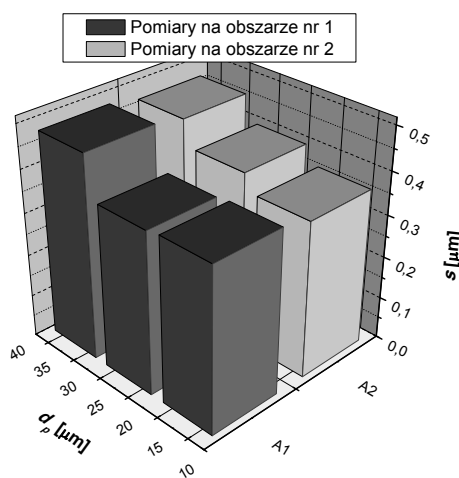
każdej z badanych warstw. Następnie wyznaczono wartości odchylenia standardowego a wyniki pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Wyniki pomiarów czujnikiem transformatorowym dla powłok cynkowych

Zwiększenie liczby pomiarów z 30 do 60 spowodowało zmniejszenie odchylenia standardowego proporcjonalnie do wzrostu grubości badanej warstwy cynkowej. Przyrost dokładności nie jest na tyle duże aby opłacało się zwiększać liczbę pomiarów co nie tylko wydłuży czas ale i skomplikowanie całego badania. Na podstawie otrzymanych wyników można przypuszczać, że dokładność będzie tym większa im większa będzie badana grubość warstwy cynkowej. Dalsze pomiary umożliwią dokładniejsze zbadanie przedstawionej tutaj zależności pomiędzy ilością wykonanych pomiarów a zmniejszeniem odchylenia standardowego dla rosnącej grubości warstwy cynkowej.

W celu wyeliminowania wpływu miejscowych niedokładności grubości warstwy cynkowej wykonano pomiary porównawcze na dwóch wybranych obszarach badanej próbki. Pokazane na rysunku 8 wartości odchylenia standardowych mają zbliżone wartości zarówno w pierwszym jak i drugim obszarze pomiarowym co pozwala przypuszczać, że niewielkie zmiany miejscowej grubości powłoki nie wpływają w sposób znaczący na dokładność pomiaru dla badanych powłok cynkowych.



Rys. 8. Wyniki pomiarów czujnikiem transformatorowym dla powłok cynkowych

Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników badań można wyprowadzić następujące sformułowania:

- badany przetwornik indukcyjny może być zastosowany do pomiarów warstw cynkowych o niewielkiej grubości w stosunku do grubości podłoża,
- przedstawiona metoda może zostać wykorzystana do oceny zmian korozyjnych warstwy ochronnej za pomocą zmodyfikowanego czujnika indukcyjnego, metodą bezinwazyjną w powłokę,
- dobór częstotliwości sygnałów pomiarowych w czujniku indukcyjnym wpływa na dokładność pomiaru i umożliwia dopasowanie sygnału do grubości badanej warstwy ochronnej,
- zwiększenie ilości pomiarów wybranej warstwy ochronnej, cynkowej pozwala zwiększyć dokładność pomiarów proporcjonalnie do grubości tej warstwy,
- wzrost grubości podłoża stalowego, na którym znajduje się badana warstwa cynkowa znacznie zmniejsza dokładność pojedynczego pomiaru pomiaru.

LITERATURA

- [1] Lewińska-Romicka A., *Pomiary grubości powłok*. Biuro Gamma, Warszawa 2001.
- [2] Głowacka M., *Inżynieria powierzchni. Powłoki i warstwy wierzchnie – wybrane zagadnienia*. Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007.
- [3] Ptak P., Borowik L., *Diagnostyka zabezpieczeń antykorozyjnych na potrzeby elektroenergetyki*. Przegląd Elektrotechniczny, 2012 nr 9a, s. 142-145.

- [4] May P., Morton D., Zhou E., *The design of a ferrite-cored probe*. Sensors and Actuators, A 136 s. 221-228.
- [5] Smetana M., Strapacova T., *Detection capabilities evaluation of the advanced sensor types in Eddy Current Testing*. Przegląd Elektrotechniczny, 2013 nr 3a, s. 247-249.
- [6] Złoto, T., Ptak, P., Prauzner, T., *Analysis of signals from inductive sensors by means of the DasyLab software*. Annales UMCS Informatica, 2012, s. 31-37.
- [7] Ptak P., Janiczek R., *Przetworniki indukcyjnościowe w pomiarach grubości warstw wierzchnich*. Przegląd Elektrotechniczny, 2007 nr 1. 86- 90.
- [8] Ptak P., Prauzner T., *Badanie czujników detekcji zagrożeń w systemach alarmowych*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10 2013, s. 274-276.
- [9] Prauzner T., *Zakłócenia elektromagnetyczne w elektronicznych systemach alarmowych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012 nr 12b, s. 205-208.
- [10] Ptak P., Borowik L., *Wzorcowanie przyrządów do pomiarów grubości warstw wierzchnich*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010 nr 04, 97-100.
- [11] Ptak P., Borowik L., *Dobór częstotliwości i rodzaju sygnału czujnika indukcyjnego na potrzeby pomiaru grubości wielowarstwowych powłok ochronnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012 nr 12b, s. 245-247.

Autorzy: dr hab. inż. Lech Borowik prof. Politechniki Częstochowskiej, dr Paweł Ptak Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: p.ptak@o2.pl