

Maria WRZUSZCZAK

Institut Elektrotechniki
WSI w Opolu

PROBLEMY REALIZACJI WZORCÓW DLA POMIARÓW KONDUKTYWNOŚCI METODA PRĄDÓW WIROWYCH

Streszczenie. Przedstawiono warunki, jakie muszą być spełnione przez wzorzec konduktywności w konдуктometrii wiroprądowej dla prawidłowego wykorzystania wzorca w kalibracji konдуктometru. Omówiono typowe błędy popełniane przy pomiarze konдукtywności metodą wiroprądową. Opisano przykładowe wzorce stosowane w USA i innych krajach. Przedyskutowano wpływ różnych czynników na jakość wzorca. Omówiono metodę skalowania konдуктometrów wiroprądowych o odczycie analogowym.

PROBLEMS OF MAKING STANDARDS FOR CONDUCTIVITY MEASUREMENT WITH EDDY CURRENT METHODS

Summary. Conditions which should be satisfied by conductivity standards in the eddy-current conductivity measurements are presented. Typical errors made when conductivity is measured by the eddy-current method are described. A method of conductivity meter scaling for eddy-current instruments with analog reading is presented. Effects of different factors on the standard are discussed. American and other standards are described as examples.

ВОПРОСЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭТАЛОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ МЕТОДОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Резюме. В статье представлены условия, которые должен выполнять эталон проводимости в вихретоковой кондуктometriи для правильного его использования во время калибровки кондуктometра. Описаны типовые ошибки возникающие в процессе измерения проводимости вихретоковым методом. Представлены примеры эталонов применяемых в США и в других странах. Обсуждено влияние разных факторов на качество эталона. Описан метод градуировки вихретоковых кондуктometrów с аналоговым отсчетом.

Pomiar konduktywności σ znalazł zastosowanie w badaniach nieniszczących, głównie w przemyśle metalurgicznym w celu określenia jakości wyrobów oraz ich własności wytrzymałościowych. Wartość liczbowa konduktywności pozwala również wnioskować o takich charakterystycznych cechach produktu, jak: skład chemiczny, własności elektryczne wyrobu. Metoda prądów wirowych umożliwia szybki pomiar bezpośrednio w hali produkcyjnej, bez konieczności wykonywania próbki.

W pomiarach konduktywności - szczególnie metali kolorowych i ich stopów - metodą prądów wirowych, podstawowym problemem metrologicznym jest brak atestowanych, dokładnych wzorców konduktywności. Są one nieodczepne do skalowania miernika wskazówkowego lub cyfrowego w jednostkach konduktywności, jak również do kalibracji przyrządu przed serią pomiarów.

1. PROBLEMY KONSTRUKCJI WZORCÓW KONDUKTYWNOŚCI

Konduktywność σ - przewodność właściwa - wg definicji jest odwrotnością rezystywności ρ (rezystancji właściwej) i dla przewodnika w kształcie drutu wyraża się znanym wzorem:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R \cdot S} \left[\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{S}}{\text{m}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

R - rezystancja,

l - długość przewodnika,

S - pole przekroju poprzecznego.

Jednostką konduktywności jest siemens/metr [S/m]. Często używa się jednostki 10^6 razy większej: MS/m. W Stanach Zjednoczonych konduktywność metali kolorowych i ich stopów jest określana według standardu IACS, w którym konduktywność przewodnika z czystej elektrolitycznej miedzi o długości 1 m i polu przekroju poprzecznego 1 mm^2 w temperaturze 20° wynosi $1/58 \Omega$, co odpowiada 100% IACS.

Metodą prądów wirowych można wyznaczać konduktywność materiałów litych oraz wyrobów o różnym kształcie. Wydaje się, że wzorce konduktywności dla pomiarów wiroprowodowych powinny mieć kształt prostopadłościanu lub walca odpowiedniej grubości. Wymiary geometryczne wzorców należy wybrać takie, aby mierzona konduktywność nie zależała od tych wymiarów (rys. 1, 2).

Przy pomiarach wiroprądowych należy uwzględnić następujące czynniki wpływające na dokładność:

- a) zjawisko naskórkowości,
- b) grubość materiału badanego,
- c) krzywiznę i chropowatość powierzchni,
- d) zmianę odległości cewki przetwornika od próbki w porównaniu z warunkami kalibrowania.

Zjawisko naskórkowości, a więc nierównomierny rozkład pola elektrycznego i magnetycznego wewnątrz materiału przewodzącego opisuje się zależnością wykładniczą:

$$H(x) = H_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

gdzie:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{2}}$$

H_0 - natężenie pola magnetycznego na powierzchni przewodnika,

ω - pulsacja prądu,

μ - przenikalność magnetyczna,

x - głębokość od powierzchni materiału niemagnetycznego,

σ - konduktywność.

Przy opisie zjawiska naskórkowości często operuje się pojęciem głębokości wnikania δ . Jest to głębokość, na której natężenie pola maleje do wartości $1/e$ wartości początkowej H_0 (na powierzchni).

Wyraża się ona wzorem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Głębokość wnikania prądów wirowych w badany metal zależy więc od częstotliwości prądu przepływającego w cewce wzbudzającej, przenikalności magnetycznej oraz konduktywności. Aby pomiar konduktywności metodą prądów wirowych nie był obciążony zbyt dużym błędem powodowanym zjawiskiem naskórkowości, doбира się grubość próbek d :

$$d \geq 3\delta$$

(4)

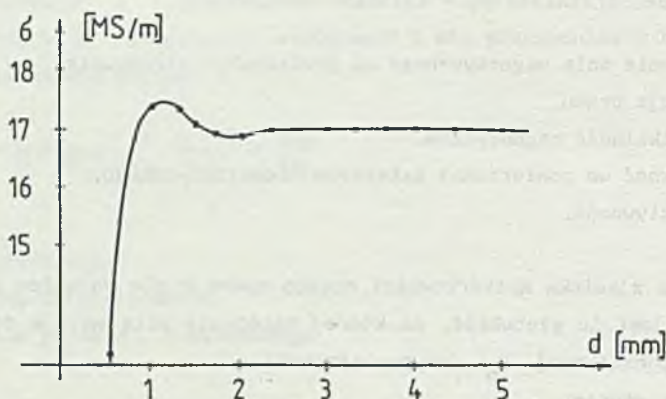
Ze wzoru (3) wynika, że głębokość wnikania δ dla różnych metali jest różna; np. dla miedzi:

$$\delta_{\text{Cu}} = \frac{6,6}{\sqrt{f}} \quad [\text{cm}]$$

gdzie:

f [Hz] - częstotliwość.

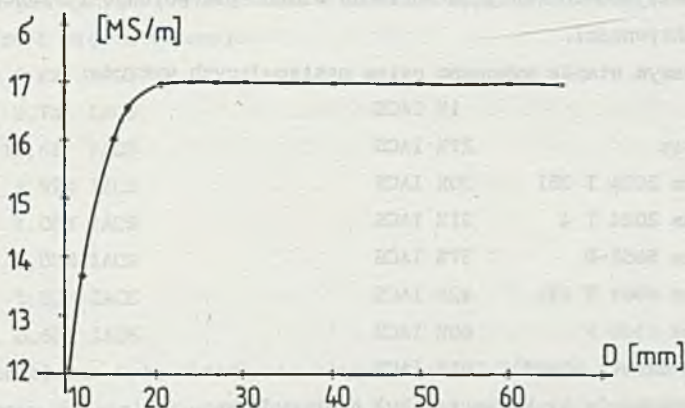
Na rys. 1 przedstawiono przykładową zależność konduktywności (mierzonej metodą wiroprądową za pomocą cewki stykowej) od grubości próbki. Jak wynika z tego doświadczenia, pomiar konduktywności próbek o małej grubości, wykonanych z tego samego materiału, jest obarczony dużym błędem. Poprawny wynik pomiaru uzyskuje się dopiero dla próbek o grubości $d > d_{\text{min}}$ uzależnionej od głębokości wnikania. W przypadku doświadczenia, którego rezultaty przedstawiono na rys. 1, grubość d_{min} powinna być np. większa od 2 mm.



Rys. 1. Zależność wyniku pomiaru konduktywności σ od grubości d próbki (cylindryczne próbki wykonano z metalu o konduktywności $\sigma = 17$ MS/m o wymiarach: średnica $D = 40$ mm, grubość $d = 0,5+5$ mm) [1]

Fig. 1. Dependence of the result of conductivity measurement σ on the thickness d of the sample (cylindric samples are made using metal with conductivity $\sigma = 17$ MS/m and dimensions: diameter $D = 40$ mm, thickness $d = 0,5+5$ mm) [1]

Następnym ważnym zagadnieniem jest określenie minimalnej średnicy wzorca. Powinna być ona uzależniona od średnicy przetwornika. Optymalną średnicę można określić na drodze doświadczalnej (rys. 2), jak również można spróbować określić ją analitycznie.



Rys. 2. Zależność wyniku pomiaru konduktywności σ od średnicy D próbki (cylindryczne próbki wykonano z metalu o konduktywności $\sigma = 17$ MS/m o wymiarach: grubość $d = 3$ mm, średnica $D = 5+60$ mm) 1

Fig. 2. Dependence of the result of conductivity measurement σ on the diameter of the sample (cylindric samples are made using metal with conductivity $\sigma = 17$ MS/m and dimensions: thickness $d = 3$ mm, diameter $D = 5+60$ mm) 1

Na podstawie wykresu z rys. 2 należałoby wybrać minimalną średnicę próbki, w tym przypadku $D_{\min} \geq 25$ mm.

Wzorce o różnej konduktywności można uzyskać z różnych metali i stopów. Należy więc utworzyć podstawowe wzorce fizyczne konduktywności dla pomiarów wiroprowodowych z metali kolorowych o dużej czystości oraz niektórych stopów. Rozwój konduktometrii wiroprowodowej wymaga ujednoczenia i znormalizowania wzorców konduktywności. Problem ten w skali światowej nie jest rozstrzygnięty. W chwili obecnej stosuje się w świecie różne wzorce, nierzadko bez atestacji. Poniżej, na podstawie dostępnej literatury przedstawiono wzorce konduktywności stosowane w innych krajach.

2. PRZEGLĄD WZORCÓW KONDUKTYWNOŚCI STOSOWANYCH W INNYCH KRAJACH

W artykułach [6, 7] przedstawiono rezultaty prac prowadzonych w firmie Boeing w Stanach Zjednoczonych mające na celu uzyskanie wzorców konduktywności różnych metali i stopów stosowanych w przemyśle lotniczym. Na wstępie tych prac przyjęto koncepcję utworzenia wzorca pierwotnego i wzorców wtórnych danej konduktywności.

Na pierwszym etapie wykonano osiem następujących wzorców:

- | | |
|--------------------------|-----------|
| 1) tytan | 1% IACS |
| 2) żółty brąz | 27% IACS |
| 3) aluminium 2024 T 351 | 30% IACS |
| 4) aluminium 2024 T 4 | 31% IACS |
| 5) aluminium 5052-0 | 37% IACS |
| 6) aluminium 6061 T 651 | 42% IACS |
| 7) aluminium 1100 F | 60% IACS |
| 8) handlowo czysta miedź | 101% IACS |

Sposób wykonania tych wzorców był następujący:

Wykonano szyny z odpowiedniego stopu lub metalu o żądanych wymiarach geometrycznych: długości 60 cali, szerokości 2 cale i grubości 0,25 cala (wybrano takie wymiary, aby można było zastosować do pomiaru rezystancji mostek DC Kelvina). Ponieważ trudno byłoby uzyskać jednakowe wymiary wszystkich szyn, pozostawiono wymiary szyn takie, jakie uzyskano po obróbce zwracając uwagę, aby było jednakowe pole przekroju poprzecznego na całej długości szyny. Bardzo staranna obróbka i ręczne wykończenie dały wymiary różniące się nie więcej niż o 0,0005 cala od wymiarów nominalnych. Wymiary szyn były zdejmowane z dokładnością 0,00015 cala przez całą długość, co 1 cal. Błąd pomiaru pola przekroju wynosił $\pm 0,05\%$. Wymiary geometryczne mierzono w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Na wstępie metodą prądów wirowych przebadano szyny, aby stwierdzić, czy nie istnieją wewnątrz wady materiałowe i wtrącenia obce. Kilka szyn zostało po tym teście odrzuconych. Następnie zmierzono rezystancję szyn komparacyjnym mostkiem Kelvina dla trzech punktów pomiarowych: na początku, w środku oraz na końcu każdej z szyn, także przy zmianie polaryzacji. Najlepszych osiem szyn przeznaczono na wzorce. Odcięto z nich kawałki o długości 44 cale tworząc w ten sposób wzorce pierwotne, a resztę szyn pocięto na kawałki o polu 1 cala², uzyskując wzorce wtórne. Szyny cięto z chłodzeniem oraz z wolnym posuwem noża, zwracając uwagę na równoległość powierzchni. Aby dokładnie zmierzyć konduktywność wzorców oraz określić współczynnik zmian termicznych opracowano specjalny układ pomiarowy ze stabilizacją temperatury

(wanna olejowa z płaszczem wodnym o wymiarach dostosowanych do wymiarów wzorców pierwotnych). Konduktywność wzorców pierwotnych zmierzono w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ z dokładnością $\pm 0,2\%$ IACS + 1% wartości odczytanej, co daje wartość błędu $\leq 0,35\%$ IACS. Wyznaczono również temperaturowy współczynnik zmian konduktywności.

W latach następnych [7] wykonano w ten sam sposób dalszych osiem wzorców (trzy z brązu i pięć z tytanu):

- brąz 6,8% IACS
- 8,7% IACS
- 16,6% IACS
- tytan 0,97% IACS
- 1,00% IACS
- 1,05% IACS
- 1,23% IACS
- 3,62% IACS

Następnym problemem było określenie błędu wzorców wtórnych. Ponieważ wykonano je w tym samym procesie technologicznym i z tej samej szyny, co wzorce pierwotne, przyjęto, że błąd wzorców wtórnych wynosi $\pm 0,35\%$ IACS $\pm 1\%$ wartości konduktywności wzorca.

W celu sprawdzenia zmierzono również konduktywność wzorców wtórnych prądem zmiennym za pomocą specjalnego mostka konduktywności - zmodyfikowanego mostka Maxwella - Wiena z uziemieniem Wagnera używając do zasilania mostka generatora o częstotliwości 100 kHz i amplitudzie 10 V stab. Uzyskano wyniki bardzo zbliżone do konduktywności wzorców pierwotnych zmierzonych temperaturowym mostkiem Kelvina. Omówione wzorce wtórne są stosowane powszechnie do badań kontrolnych w procesie produkcji w firmie Boeing.

W artykułach [10, 11] opisano prace prowadzone w Republice Federalnej Niemiec nad unormowaniem pomiarów wiropądowych. Zwraca się w nich uwagę na konieczność międzynarodowego ujednoczenia norm dotyczących badań nieniszczących.

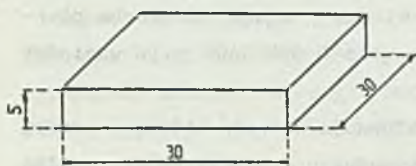
W ZSRR [4, 5] zarejestrowano w 1978 roku w spisie wzorców o numerach (1395-78)+(1412-78) osiemnaście wzorców o konduktywności 14+37 MS/m - poszczególne wzorce różnią się od siebie o 0,5+1,5 MS/m. Wzorce o różnej konduktywności uzyskano na bazie aluminium z dodatkiem magnezu i manganu o różnym udziale procentowym. Wykonano je ze stopu Al z dodatkiem Mg od 0,2% do 6,0% (co 0,2%) oraz dodatkową domieszką Mn dla stopu Al + 6% Mg + Mn (od 0,4%+1,3% co 0,2%+0,4%). Sposób wykonania tych wzorców był następujący: elementy odlewane o średnicy 90 mm i długości 270 mm poddawano homogenizacji

w temperaturze 400°C przez 24 godziny. Następnie walcowano je do przekroju 5 x 30 mm i odpowiedniej długości, odprężano w temperaturze 150°C przez 4 godziny, aby osiągnąć stabilizację struktury i właściwości. Z kolei zmierzono kilkakrotne rezystancję tak powstałych szyn, odrzucając szyny o skrajnych parametrach. Rezystancję mierzono mostkiem prądu stałego (przyrząd Y-303) w temperaturze 20°C i na tej podstawie określono konduktywność materiału szyn. Następnie szyny pocięto na prostokątne o wymiarach: 30 x 30 x 5 mm. Wymiary geometryczne mierzono za pomocą mikrometru z dokładnością do 0,01 mm. Przyjęto, że błąd wzorca konduktywności

$$\delta\sigma = \delta R + \delta a + \delta b + \delta c \quad (5)$$

gdzie;

- δR - błąd pomiaru rezystancji przyrządu Y-303 (zależny od zakresu),
 $\delta a, \delta b, \delta c$ - błąd pomiaru długości, szerokości i wysokości wzorca.



Rys. 3. Wymiary standardowych wzorców konduktywności w ZSRR

Fig. 3. Dimension of conductivity standards in USSR

Na podstawie wzoru (5) określono maksymalny błąd wzorców: dla zakresu σ do 33,3 MS/m wynosi on 0,5%, a dla $\sigma > 33,3$ MS/m wynosi 1% [3]. Zestawy 18 wzorców konduktywności z zakresu 14 - 37 MS/m przyklejono na jedną płytkę. Uzyskały one atest Państwowej Komisji Normalizacyjnej ZSRR w 1978 roku i są używane do chwili obecnej.

Zestaw wzorców konduktywności uzupełniono w roku 1986 o konduktywności wzorcowe z zakresu:

0,5+2,0 MS/m o błędzie wzorca 1,5% nr (3447-86)+(3458-86)

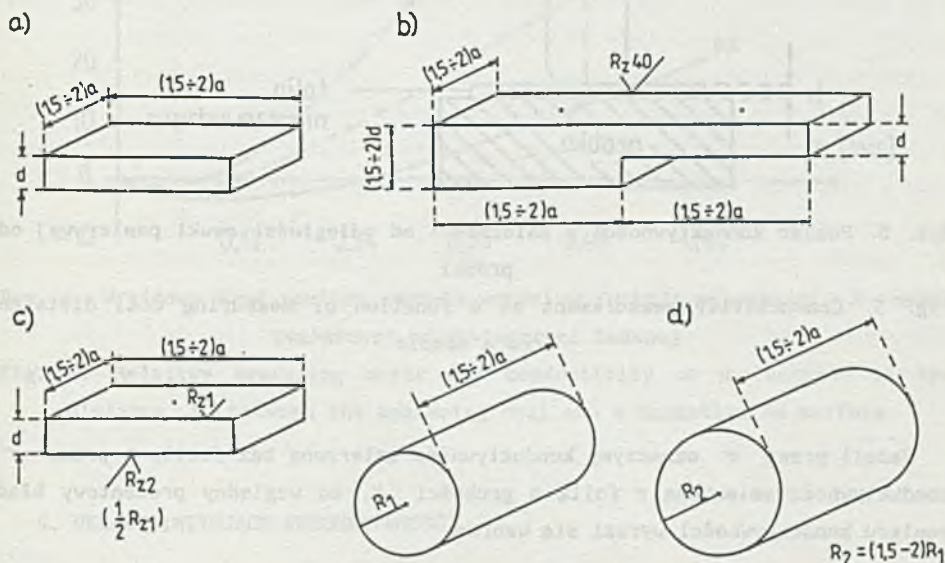
3,0+15,0 MS/m o błędzie wzorca 1% nr (3435-86)+(3446-86)

Wzorce te wykonano na bazie bizmutu i kadmu.

3. WPŁYW KRZYWIZNY I CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU KONDUKTYWNOŚCI

Przy pomiarach konduktywności metodą prądów wirowych ważne jest, aby wynik pomiaru nie zależał od nierówności powierzchni materiału badanego, a w szczególności od chropowatości. Jeżeli wpływów tych nie da się uniknąć, należy wprowadzić "poprawki".

Aby określić wpływ krzywizny powierzchni materiału badanego lub chropowatości powierzchni na wynik pomiaru, należałoby miernikiem konduktywności dokonać serii pomiarów na odpowiednich wzorcach chropowatości oraz wzorcach krzywizny. Maksymalny promień krzywizny nie wpływający na wskazanie przyrządu można ocenić za pomocą zbioru wzorców o różnych średnicach (określenie poprawki "od promienia" pozwala mierzyć konduktywność prętów i rur). Do badania wpływu chropowatości używa się wzorców o różnej porowatości (np. od 1-100 μm). Wyroby metalowe toczone, wyciskane lub prasowane mają chropowatość $<40 \mu\text{m}$. Większość przyrządów do pomiaru konduktywności jest "nieczuła" na chropowatości tego rzędu. W ZSRR zaproponowano [1] do tego celu wzorce przedstawione na rys. 4.



Rys. 4. Wzorce specjalne stosowane w ZSRR dla pomiarów konduktywności metoda prądów wirowych

a) dla określenia zależności konduktywności od przyłożenia cewki pomiarowej, b) dla określenia wpływu grubości, c) dla określenia wpływu chropowatości, d) dla określenia wpływu promienia krzywizny (dla przetworników typu "ołówkowego" zaleca się wzorce o średnicy 5-20 mm)

a - minimalny dopuszczalny wymiar wzorca, d - minimalna dopuszczalna grubość wzorca (określone na podstawie wykresów z rys. 1 i 2)

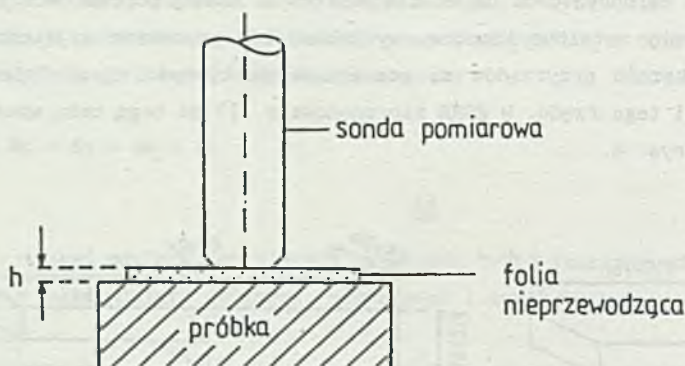
Fig. 4. Special standards used in USSR for conductivity measurements via eddy current method

a) to define a dependence of conductivity on measuring coil placement, b) to define an effect of thickness, c) to define an effect of roughness, d) to define an effect of curvature radius (for pencil type transducers, standards with diameter 5+20 mm are recommended)

a - minimal admissible standard dimension, d - minimal admissible standard thickness (defined basing on graphs from fig. 1 and fig. 2)

4. WPŁYW ZMIANY ODLEGŁOŚCI CEWKI PRZETWORNIKA OD PRÓBKII W PORÓWNANIU Z WARUNKAMI KALIBROWANIA

Zależność konduktywności mierzonej od szerokości szczeliny pomiędzy cewką przetwornika a próbką w metodzie stykowej wyznacza się na podstawie pomiarów z nieprzewodzącą folią polistyrenową (rys. 5).



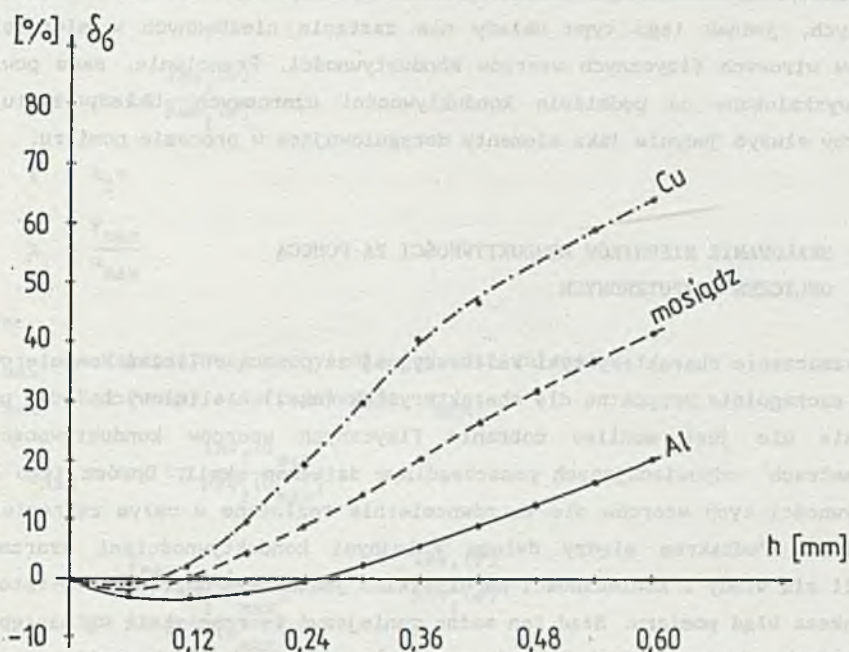
Rys. 5. Pomiar konduktywności w zależności od odległości cewki pomiarowej od próbki

Fig. 5. Conductivity measurement as a function of measuring coil distance from a sample

Jeżeli przez σ oznaczymy konduktywność zmierzoną bez folii, a przez σ' konduktywność zmierzoną z folią o grubości h , to względny procentowy błąd pomiaru konduktywności wyrazi się wzorem:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma - \sigma'}{\sigma} \cdot 100\% \quad (6)$$

Na wykresie z rys. 6 przedstawiono zależność (6) od szerokości szczeliny dla próbek wykonanych z miedzi, miedzi i aluminium. Pomiarów dokonywano konduktometrem TG wyprodukowanym w Instytucie dr Förstera. Grubość folii mierzono za pomocą śruby mikrometrycznej z dokładnością do 0,01 mm.

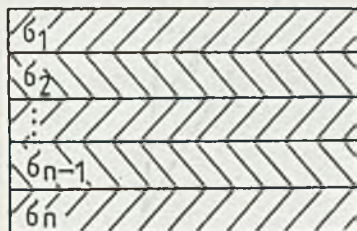


Rys. 6. Względny błąd pomiaru konduktywności w funkcji odległości h cewki pomiarowej od powierzchni badanej

Fig. 6. Relative measuring error for conductivity as a function of the distance h between the measuring coil and a investigated surface

5. UKŁADY IMITUJĄCE KONDUKTYWNOŚĆ

W pracach [4, 9] opisano próby tworzenia wielowarstwowych imitatorów konduktywności składających się z kilku warstw materiałów niemagnetycznych o różnej konduktywności (rys. 7); jednak nie znalazły one szerszego zastosowania.



Rys. 7. Warstwowy imitator konduktywności

Fig. 7. Laminar conductivity imitator

Można próbować zbudować imitatory konduktywności na bazie układów elektro-
nicznych, jednak tego typu układy nie zastąpią niezbędnych w miernictwie
prądów wirowych fizycznych wzorców konduktywności. Przeciwnie, same powinny
być wyskalowane na podstawie konduktywności wzorcowych. Układy imitujące
mogłyby służyć jedynie jako elementy doregulowujące w procesie pomiaru.

6. SKALOWANIE MIERNIKÓW KONDUKTYWNOŚCI ZA POMOCĄ OBLICZEŃ KOMPUTEROWYCH

Wyznaczanie charakterystyki kalibracyjnej za pomocą obliczeń komputerowych
jest szczególnie przydatne dla charakterystyk (skal) nieliniowych, gdyż prak-
tycznie nie jest możliwe dobranie fizycznych wzorców konduktywności o
parametrach odpowiadających poszczególnym działkom skali. Oprócz tego kon-
duktywności tych wzorców nie są równomiernie rozłożone w całym zakresie po-
miarowym. Podzakres między dwiema kolejnymi konduktywnościami wzorcowymi
dzieli się wtedy z konieczności na działki o jednakowym odstępnie, co istotnie
powiększa błąd pomiaru. Błąd ten można zmniejszyć tworząc skalę wg następują-
cej metody: tworzymy funkcję wpływu $\Phi(\sigma)$ wiążącą konduktywność materiału
badanego z metodą przetwarzania wiropądowego; dla materiałów niemagnetycz-
nych funkcja ta ma postać [2]:

$$\begin{aligned} \Phi_1(\sigma) &= \frac{1 - \sqrt{1 + j\left(\frac{\beta}{3}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 + j\left(\frac{\beta}{3}\right)^2}} = \frac{\sqrt{a} - 2}{\sqrt{a}(\sqrt{a} + \sqrt{2})} (\sqrt{2} - j\sqrt{a-2}) = \\ &= \operatorname{Re}\Phi_1(\sigma) + j\operatorname{Im}\Phi_1(\sigma) \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$$j^2 = -1 \quad a = \sqrt{1 + \left(\frac{\beta}{3}\right)^4} + 1 \quad \beta = D\sqrt{\omega\mu_0\sigma}$$

- D - średnica cewki przetwornika,
- ω - pulsacja prądu,
- μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni.



Wychylenie γ fazoczułego miernika jest proporcjonalne do kąta fazowego α :

$$\alpha = \arctg \frac{\operatorname{Im}\phi_1(\sigma)}{\operatorname{Re}\phi_1(\sigma)} \quad (8)$$

$$\gamma = k_1 \alpha \quad (9)$$

$$k_1 = \frac{\gamma_{\max}}{\alpha_{\max}} \quad (10)$$

gdzie:

γ_{\max} - maksymalny kąt wychylenia wskazówki miernika,

α_{\max} - kąt fazowy, który powoduje γ_{\max} ,

$$\alpha_{\max} = \arctg \frac{\operatorname{Im}\phi_1(\sigma_{\max})}{\operatorname{Re}\phi_1(\sigma_{\max})}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_{\max}}{\arctg \frac{\operatorname{Im}\phi_1(\sigma_{\max})}{\operatorname{Re}\phi_1(\sigma_{\max})}} \arctg \frac{\operatorname{Im}\phi_1(\sigma)}{\operatorname{Re}\phi_1(\sigma)} \quad (11)$$

Dla wygody budowania skali mierników analogowych i dokładniejszej kalibracji wyznacza się nie kąt γ , ale liniowe wielkości A proporcjonalnej do nich (cięciwy).

$$A = 2R \sin \frac{\gamma}{2} = 2R \sin \left[\frac{\gamma_{\max} \arctg \frac{\operatorname{Im}\phi_1(\sigma)}{\operatorname{Re}\phi_1(\sigma)}}{2 \arctg \frac{\operatorname{Im}\phi_1(\sigma)}{\operatorname{Re}\phi_1(\sigma)}} \right] \quad (12)$$

gdzie:

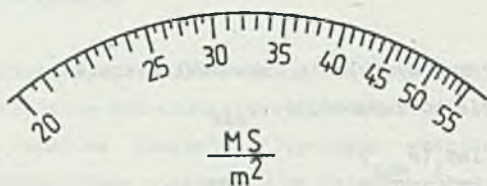
R - długość wskazówki miernika.



Rys. 8. Ilustracyjne przedstawienia kąta wychylenia wskazówki miernika

Fig. 8. Illustrative presentation of the angle swingle of the pointer

Na podstawie wzorów (7)+(12) oblicza się długość cieniwy A odpowiadającej konduktywności σ . Obliczeń dokonuje się dla poszczególnych punktów skali. Oczywiście konieczne jest sprawdzenie poprawności wycechowania przyrządu za pomocą fizycznych wzorców (co najmniej dwu na każdym z podzakresów: na początku i na końcu). Na rys. 9 przedstawiono przykład nieliniowej skali miernika konduktywności uzyskanej na drodze obliczeniowej.



Rys. 9. Nieliniowa skala mikroamperomierza wykalibrowana w jednostkach konduktywności

Fig. 9. Nonlinear microammeter scale calibrated in conductivity units

LITERATURA

- [1] Наумов Н.М. Риблин А.М. Агапов Ю.Н. и др: Метрологическое обеспечение вихре-токовых измерителей удельной электрической проводимости. Дефектоскопия 1987, nr 1.
- [2] Косовский Д.И. Конжуков Ф.И.: Градуирование вихретоковых измерителей удельной электрической проводимости без образцов. Дефектоскопия 1985, nr 12.
- [3] Наумов Н.М. Микляев П.Т.: Стандартные образцы для измерения удельной электропроводности. Дефектоскопия 1979, nr 8.
- [4] Косовский Д.И.: Имитаторы электрической проводимости для вихретоковых приборов. Дефектоскопия 1980, nr 4.
- [5] Авраменко А.А. Горкунов Б.М. Себко В.П.: Бесконтактное измерение удельной электрической проводимости. Дефектоскопия 1988, nr 12.
- [6] Jones A.R.: The measurement of the standard conductivity models. Material Research and Standards, nr 11, 1968.
- [7] Jones A.R.: Eddy current meter standards. How good are they. Materials Evaluations, nr 1, 1977.

- [8] Косовский Д.И. Шкарлет Ю.М.: Пути создания стандартных образцов электрической проводимости для вихретоковых приборов. Дефектоскопия 1980, нр 2.
- [9] Косовский Д.И. Шкарлет Ю.М.: Вихретоковые многослойные стандартные образцы электрической проводимости. Дефектоскопия 1980, нр 2.
- [10] Pfisterer H., Wittig G.: Wirbelstromprüfung. Stand der Normung in Deutschland, Materialprüfung 1987, Nr 9.
- [11] Rauls W.: Europäische Normungsarbeit - Neue Regeln mit entscheidenden nationalen Konsequenzen. Materialprüfung 1988, Nr 7-8.
- [12] Wittig G., Thomas H.M.: Ein Beitrag zur Kalibrierung und Auswertung von Signalen in der Wirbelstromprüfung mit Rechnerunterstützung. Materialprüfung 1987, Nr 7-8.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy KOPKA

Wpłynęło do Redakcji w maju 1990 r.

A b s t r a c t

The problem of attested conductivity standards, made of appropriate materials, plays an important part in measuring conductivity of non-ferromagnetic metals and their alloys with the use of various eddy current conductivity meters. There are two purposes for which the standards are used. First of all, scales of eddy current conductivity meters are made with the use of a series of such standards. Besides, standards of this type are usually attached to a conductivity meter to enable current calibration just before a measurement. The paper presents attempts and methods of making such standards in the USA and in the Soviet Union, standardised shapes and dimensions of standards, influence of some factors on the result of a conductivity measurement using an eddy current method, substitute standards (so called "imitating") and methods of scaling conductivity meters with analogue reading on the basis of the computer analysis of the mathematical model of the "contact coil-test material" system.