Seria: AUTOMATYKA z. 111

Stanisław MALZACHER Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej

ZASTOSOWANIE PRADÓW WIROWYCH W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH

Streszczenie. Podano zasadę nieniszczącego pomiaru konduktywności, nieniszczącej kontroli jakości lub wymiarów geometrycznych metodą prądów wirowych. Pomiar konduktywności omówiono na przykładzie sond z cewką stykową z uwzględnieniem różnych czynników zakłócających. Kontrolę jakości w postaci defektoskopii wiroprądowej oraz kontrolę wymiarów omówiono dla przypadków cewek przelotowych. Zagadnienia te przedstawiono opierając się na opracowanych wcześniej modelach matematycznych układu "cewka stykowa-materiał badany" oraz wynikach własnych doświadczeń.

APPLICATIONS OF EDDY CURRENTS IN NON-DESTRUCTIVE TESTING

Summary. A principle of non-destructive measurements of conductivity, non-destructive quality control and control of geometric dimensions by eddy current method is given. Conductivity measurements are described using contact coil probe as an example in the presence of different disturbance factors. The quality control in the form of eddy current flaw detection and dimension control is considered for passage coils, these problems are presented basing on the mathematical models for the system contact coll - investigated mnaterial and results of own experiments.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Резюме. В статье представлен принцип неразрушающего измерения проводимости, неразрушающего контроля качества или геометрических измерений методом вихревых токов. Измерение проводимости показано на примере зоидов с контактной катушкой с учетом различных помех. Рассмотрена контроль качества в виде вихретоковой дежектоскопии и контроль измерений для случая пролетных катушек. Представляемые проблемы являются результатом разработанных раньше математических моделей схемы "контактная катушка исследуеный материал" и проведенных испытаний.

1. WPROWADZENIE

Zjawisko prądów wirowych odkryte w połowie XIX w. przez francuskiego fizyka J.B. Foucalta, powodujące stratę energii elektrycznej w wyniku jej przemiany na ciepło w rdzeniach transformatorów oraz obwodach magnetycznych maszyn elektrycznych nie znajdowało początkowo praktycznego zastosowania w technice. Dopiero pod koniec XIX i na początku XX wieku zaczęto je wykorzystywać w licznikach indukcyjnych, hamulcach elektromagnetycznych. w grzejnictwie indukcyjnym i przyrządach elektrycznych do tłumienia wahań części ruchomej. Na przełomie lat 1938 i 1939 zaiteresował się prądami wirowymi fizyk niemiecki Fryderyk Förster w kilka lat po drugiej wojnie światowej przystosował je do badań nieniszczących w założonym przez siebie instytucie naukowym w Reutlingen.

Zastosowanie techniki prądów wirowych w tej nowej dziedzinie umożliwiło wyszukiwanie w sposób nieniszczący ukrytych przy powierzchni, wad materiałowych w elementach wykonanych z materiałów przewodzących – niemagnetycznych i magnetycznych, określanie niejednorodności powierzchniowej struktury tych materiałów i ocenę zmiany ich składników. Wiroprądowe badania nieniszczące pozwalają obecnie na sortowanie wyrobów z metali (np. ze względu na ich konduktywność lub wymiary geometryczne), wykrywanie pęknięć, rozwarstwień, rozrzedzeń i wtrąceń niemetalicznych (defektoskopia), pomiar grubości folii i pokryć niemetalicznych na podłożu metalicznym i wiele innych.

Cechą charakterystyczną tych badań jest to, że są one najbardziej skuteczne dla obszarów leżących w pobliżu powierzchni kontrolowanych obiektów. Odnosi się to w szczególności do defektoskopii wiroprądowej. Ocena końcowa, a więc wynik kontroli, nie jest na ogół osiągany bezpośrednio. Wcześniej muszą być bowiem znane związki lub korelacje między – najogólniej mówiąc – mierzonymi wielkościami i pożądanymi lub wymaganymi charakterystycznymi cechami elementu badanego. Do znajomości takich związków dochodzi się w różny sposób, np. na drodze eksperymentów, przez korzystanie z elementów (próbek) wzorcowych, za zasadzie różnych metod modelowania itp.

2. METODY WIROPRADOWE BADAN NIENISZCZĄCYCH

Wiroprądowe metody nieniszczących polegają – najogólniej mówiąc – na wykrywaniu zmian wielkości lub własności fizycznych materiału w poddawanych kontroli elementach, dzięki wykorzystaniu właściwości zmiennego pola magne-

Zastosowanie prądów wirowych...

tycznego. Pole to jest wytwarzane przez cewkę (sonda) zasilaną prądem zmiennym. Wartość natężenia tego prądu (np. wartość skuteczna) dla cewki pustej jak mówimy "w powietrzu" - a wiec nie zawierającej metalu lub oddalonej od przedmiotów metalowych i zasilanej określonym napieciem zmiennym, jest ściśle określona. Jeżli teraz do cewki wprowadzimy badany element metalowy (cewka przelotowa) lub cewkę zbliżymy do elementu (cewka stykowa), wówczas przepływający przez nią prąd zmienny wyindukuje w metalu prąd wirowy. Wartość natężenia tego pradu (np. wartość skuteczna) jest funkcją natężenia i częstotliwości prądu przepływającego w tych warunkach przez cewkę i zależy ponadto od kondyktywności i przenikalności magnetycznej materiału badanego elementu, jego kształtu, wzajemnego usytuowania cewki i elementu (np. odległości cewki stykowej od powierzchni materiału) i wreszcie od istnienia lub braku nieciągłości albo niejednorodności w powierzchniowej strukturze elementu. Pomijamy tu wpływ temperatury (np. temperatury otoczenia lub temperatury elementu) zakładając, że badania są przeprowadzane zawsze w normalnej i stałej temperaturze.

Wyindukowane, w poddawanym kontroli elemencie, prądy wirowe wytwarzają własne pole magnetyczne skierowane - zgodnie z regułą Lenza - przeciwnie niż pierwotne pole pustej cewki. W wyniku takiego oddziaływania w obrębie cewki powstaje pewne pole wypadkowe. Nasze rozumowanie możemy więc sprowadzić do stwierdzenia, że wprowadzenie elementu metalowego w obręb cewki powoduje zmianę wartości przepływającego przez nią prądu, co przy założeniu niezmienności napięcia zasilającego odpowiada zmianie impedencji cewki. W ślad za tym zmiana własności lub określonych wielkości fizycznych kontrolowanego elementu (np. pojawienie się pęknięć, przemiana strukturalna, zmniejszenie konduktywności w wyniku obróbki cieplnej itp.) musi również spowodować zmianę impedancji cewki. Zmiana ta może być stwierdzona wieloma metodami i służyć do oceny wady materiałowej, różnic w strukturze metalurgicznej, składzie chemicznym, wymiarach geometrycznych itp.

W opisywanym przypadku, jednym z najprostszych, przez cewkę płynął prąd wzbudzający i ta sama cewka stanowiła źródło sygnału pomiarowego (kontrolnego). Sygnałem tym była zmiana impedancji cewki lub składowych tej impedancji. Warto zauważyć, że role te można przydzielić dwom różnym cewkom: wzbudzającej i odbiorczej, co nie zmienia istoty rzeczy.

Opisaną zasadę badań wiroprądowych ilustruje rys. 1. Cewka przelotowa (rys. 1a) lub stykowa (rys. 1b) może być uważana za obwód pierwotny o indukcyjności własnej ("w powietrzu") L₁ i rezystancji własnej ("w powietrzu") R₁. Badany element metalowy może uważać za obwód wtórny o indukcyjności L₂

(1)

(2)



Rys. 1. Zasada wiroprądowych badań nieniszczących a) cewka (sonda) przelotowa, b) cewka (sonda) stykowa, c) interpretacja elektryczna: dwuobwodowy schemat zastępczy, b) schemat zastępczy jednoobwodowy

Fig. 1. Principle of eddy current non-destructive testing a) measuring soil (probe), b) contact coil (probe), c) electrical interpretation: double circuit substitutional scheme, d) single circuit substitutional scheme

i rezystancji R₂ (rys. 1c), sprzężony indukcyjnościowo z obwodem pierwotnym. Cewka i badany element tworzą zespół, który może być zastąpiony jednym układem, jak na rys. 1d.

Jeśli badany element jest metalem, to w wyniku takiego sprzężenia otrzymujemy znane związki

$$R'_1 = R_1 + \frac{R_2}{p^2} = R_1 + R'_2$$

$$L'_1 = L_1 (\bar{\tau}) \frac{L_2}{p^2} = L_1 (\bar{\tau}) L'_2$$

gdzie:

- R' wypadkowa, podwyższona rezystancja cewki, w wyniku sprzężenia indukcyjnościowego, między cewką (sondą) i badanym materiałem;
- L' wypadkowa, obniżona indukcyjność cewki (reaktancja indukcyjnościowa) w wyniku sprzężenia - jak wyżej,

przy czym p = $\sqrt{\frac{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}{2.2}}$ jest przekładnią napięciową sprzężenia między

cewką i badanym metalem, a M współczynnikiem indukcyjności wzajemnej w tym

układzie. Wielkości: $R'_2 = \frac{R_2}{n^2}$ i $L'_2 = \frac{L_2}{n^2}$ stanowią zastępczą rezystancję i

zastępczą indukcyjność metalu (reaktancję indukcyjnościową metalu), przeniesione na stronę pierwotną układu, to znaczy "wniesione" do cewki (sondy). Znak przy L' zależy od tego, czy mamy do czynienia z metalem nieferromagnetycznym (znak "-") czy z materiałem ferromagnetycznym (znak "+"). W tym drugim przypadku wprowadzenie materiału ferromagnetycznego o znacznej przenikalności magnetycznej do cewki powoduje oczywisty przyrost gęstości strumienia, a więc i indukcyjności. Opisaną sytuację, interpetującą wyrażenia (1) i (2). ilustruje rys. 2, na którym przedstawiono zmiany składowych impedancji cewki pomiarowej (sondy) w wyniku jej sprzężenia z materiałem nieferromagnetycznym lub ferromagnetycznym. Jeżeli teraz weżmiemy pod uwagę, że zmiana składowych impedancji może być spowodowana istnieniem lub brakiem przewodzącego materiału w pobliżu cewki, zmianą jego konduktywności, istnieniem lub brakiem nieciągłości w materiale itp., to staje się oczywiste, że zmiany tych składowych mogą stanowić miarę lub przynajmniej wskazówkę o zmianie tych parametrów lub cech. Niestety, jednocześnie z tym stwierdzeniem łatwo możemy zauważyć, że określone - takie same - przyrosty składowych impedancji mogą być spowodowane zmianami różnych parametrów lub własności; różne przyczyny dają takie same skutki. Powstaje więc konieczność poszukiwania takich metod pomiarowych, które umożliwiałyby eliminację wpływów niepożądanych przy uwypukleniu wpływu zmian parametru mierzonego lub kontrolowanego.

Dążenie do uzyskania silnego oddziaływania badanego materiału na zmiany impedancji cewki pomiarowej (sondy) składnia do stosowania wielkiej częstotliwości prądu zasilającego cewkę. Dlatego w konduktometrii wiroprądowej zakres stosowanych częstotliwości zawiera się w granicach od kilku tysięcy do kilku milionów herców. Konieczność stosowania wielkich częstotliwości jest



Rys. 2. Zmiana impedancji cewki pomiarowej (sondy) i składowych impedancji w wyniku sprzężenia z materiałem nieferromagnetycznym lub ferromagnetycznym 1 - cewka pusta (cewka w powietrzu), 2 - cewka nad materiałem nieferromagnetycznym nie zawierającym nieciągłości (wad), 3 - cewka nad materiałem nieferromagnetycznym zawierającym nieciągłości (wady), 4 - cewka nad materiałem ferromagnetycznym nie zawierającym nieciągłości (wad), 5 - cewka nad materiałem ferromagnetycznym zawierającym nieciągłości (wady)

Fig. 2. Change of the impedance of the measuring coil (probe) and its components resulting from coupling with nonferromagnetic or ferromagnetic materials

1 - empty coil (air-content coil), 2 - coil over nonferromagnetic material which does not contain discontinuoities (failures), 3 - coil over nonferromagnetic material which contains discontinuoities (failures), 4 - coil over ferromagnetic material which does not cintain discontinuoities (failures), 5 - coil over ferromagnetic material which contains discontinuoities (failures) szczególnie uzasadniona przy badaniu materiału o małej konduktywności (dużej rezystywności). Następstwem tego jest jednak to, że skutkiem zjawiska naskórkowości prąd wirowy "penetruje" w głąb materiału tylko do bardzo małej głębokości. Głębokość tę, zwaną głębokością wnikania, możemy wyznaczać według kilku różnych kryteriów. Najbardziej znane (m.in. z teorii nagrzewania indukcyjnego) powiada, że na głębokości δ gęstość prądu maleje e = 2,718... razy, przy czym dla metali kolorowych, nieferromagnetycznych

$$\delta [m] = 5,03 \sqrt{\frac{1}{1 \cdot \sigma}}$$

(3)

gdzie:

f - częstotliwość [Hz],

σ - konduktywność [MS/m].

Występująca tu jednostka konduktywności 1 [MS/m] jest najczęściej stosowaną w Europie. Oprócz niej stosuje się również jednostkę przyjętą z norm amerykańskich, wyrażoną w procentach konduktywności czystej miedzi – tzw. 1 [IACS] (International Annealed Copper Standard). Przybliżoną skalę porównawczo – przeliczeniową z MS/m na % IACS i odwrotnie, z zaznaczeniem konduktywności przykładowych metali, pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Skala porównawcza konduktywności wyrażonych w MS/m i % IACS z przykładowymi wartościami konduktywności niektórych metali i stopów Fig. 3. Comparison scale for conductancy expressed in MS/m and % IACS with exemplary values of conductance for some alloys

3. KONDUKTOMETRIA WIROPRADOWA

Jednym z podstawowych zastosowań wiroprądowych badań nieniszczących jest pomiar konduktywności kolorowych (nieferromagnetycznych) metali i ich stopów. Nie wymaga on tworzenia pracochłonnych i kosztownych próbek (np. kalibrowanych drutów i prętów), a pewna niedogodność, polegająca na niezbyt dużej dokładności pomiaru, jest kompensowana jego prostotą i krótkim czasem trwania. Dzięki tej możliwości szybkiego dokonywania nieniszczącego pomiaru, metoda jest szczególnie przydatna do sortowania wyrobów z metali kolorowych. Zasadę takiego pomiaru konduktywności możemy objaśnić następującym rozumowaniem.

Załóżmy, że mamy do dyspozycji miernik składowych impedancji pozwalający na pomiar tych składowych w szerokim zakresie częstotliwości. Korzystając wówczas z układu przedstawionego na rys. 1d możemy dla szeregowego obwodu $R'_1 - L'_1$, zasilanego napięciem o niezmiennej wartości U i stałej częstotliwości f, zbudować wykres miejsc geometrycznych przedstawiający zmianę położenia wektora Z' = R'_1 + j ω L'₁ przy zmianach jego parametrów: R'_1 i L'₁. Zgodnie z początkowym założeniem, interesującym nas parametrem będzie konduktywność σ . Wielkościami, które - jak można się spodziewać - mogą dodatkowo wpływać na wynik pomiaru, będą czynniki zakłócające. Do czynników tych należy przede wszystkim oddalenie sondy od powierzchni badanego elementu (ang. "lift-off"). Drugim czynnikiem zakłócającym jest grubość badanego przedmiotu, np. grubość płyty, folii, ścianki itp. Wpływ zakłócający może wywierać również niewłaściwe położenie sondy względem badanego obiektu, np. tzw. efekt krawędziowy (ang. "edge effect", "end effect"). Nasze dalsze rozważania ograniczymy do przypadku najbardziej interesującego, czyli cewki stykowej.

Przyjmijmy, że badane elementy posiadają znaczną grubość, a cewka stykowa w czasie badania całkowicie do nich przylega. Założenie to pozwala pominąć we wstępnych rozważaniach wpływ czynników zakłócających. Mierząc składowe impedancji takiej cewki możemy zbudować znormalizowany wykres miejsc geometrycznych końca wektora impedancji, dla różnych próbek materiałowych, a więc różnych konduktywności. Zazwyczaj wielkością, względem której normalizujemy, jest ωL_1 - reaktancja indukcyjnościowa pustej cewki ("cewki w powietrzu"). Przykłady takich wykresów podano na rys. 4. Zostały one sporządzone na podstawie pomiaru składowych impedancji cewki stykowej "obciążonej" badanym elementem i zasilanej kolejno prądami o różnych częstotliwościach. Wszystkie wykresy rozpoczynają się od punktu "P" w górnej części. Odpowiada on sytuacji, gdy cewka jest pusta i znajduje się, jak mówimy, "w powietrzu".



Rys. 4a, b

21

Zastosowanie prądów wirowych..



Rys. 4. Znormalizowane wykresy zmian impedancji (składowych impedancji) cewki stykowej (sondy) zbliżonej do różnych metali przy częstotliwościach: 2 kHz, 20 kHz, 200 kHz z uwzględnieniem wpływu oddalenia (b,c) cewki i wpływu grubości materiału (c)

Fig. 4. Normalized graphs of impedance charges (components of impedance) for contact coil (probe) approaching different metals with frequencies: 2 kHz, 20 kHz, 200 kHz taking into account the effect of a distance (b,c) of the coil and of the material thickness (c)

Jej indukcyjność wynosi L_1 , reaktancja indukcyjnościowa ωL_1 , rezystancja własna R_1 , zgodnie z rys. 1c.

Rozpatrzmy wpierw wykres przedstawiony na rys. 4a, odpowiadający częstotliwości zasilania 2 kHz. Wprowadzając kolejno w obręb cewki różne materiały przewodzące (np. grafit, ołów, brąz, mosiądz, aluminium, miedź itp.), uzyskujemy przesuwanie się końca wektora impedancji po pseudopółokręgu. W przypadku gdy cewka jest zbliżona do grafitu, sytuacja mało się różni od przypadku cewki pustej. Konduktywność grafitu jest nieznaczna i wyindukowany w nim prąd wirowy ma bardzo małe natężenie, niewielki jest więc również strumień, jaki on wytwarza i przeciwstawia strumieniowi cewki. W rezultacie zmiana (zmniejszenie) indukcyjności $\Delta L = L_1 - L'_1$ będzie nieduża. Punkt odpowiadający grafitowi znajduje się więc bardzo blisko punktu "cewka w powietrzu". Dalszy, taki sam, tok rozumowania prowadzi nas do wniosku, że im większa będzie konduktywność materiału, tym bardziej w dół przemieści się punkt na charakterystyce. Ostatnie najniżej położone punkty będą odpowiadać konduktywności miedzi i srebra. Wartości konduktywności dla poszczególnych punktów nie są rozłożone równomiernie (liniowo). Korzystając ze skali porównawczej przedstawionej na rys. 3 możemy zauważyć, że między mosiądzem i aluminium jest w przybliżeniu taka sama "odległość" jak między aluminium i miedzią, natomiast między grafitem i brązem w przybliżeniu taka sama, jak między miedzią i srebrem. Jeżeli te same "odległości" spróbujemy znależć na wykresach miejsc geometrycznych otrzymanych dla różnych częstotliwości, to stwierdzimy, że występuje tu nierównomierne rozłożenie punktów. Na przykład "odległość" między mosiądzem i aluminium, mierząc wzdłuż krzywej, jest równa prawie podwójnej "odległości" między aluminium i miedzią. Podobne zjawiska spotykamy i dla innych przypadków. Rozrzedzenia i szczególnie zagęszczenia w rozłożeniu punktów pomiarowych na charakterystyce mogą spowodować trudności w rozróżnieniu rodzaju metalu na podstawie odczytu konduktywności. Częściową poprawę można uzyskać dobierając dla określonej grupy metali lub stopów, a więc określonego zakresu konduktywności, odpowiednią częstotliwość pomiarową. Ilustrują to kolejne rysunki 4a, 4b i 4c. Wzrost częstotliwości pomiarowej pociąga za sobą powiększenie natężenia prądów wirowych wzbudzanych w materiale badanym, a więc także zwiększenie strumienia magnetycznego od tych prądów i w następstwie zmniejszenie wypadkowej indukcyjności L' cewki pomiarowej. Punkt charakteryzujący konduktywność danego materiału przesuwa się więc w dół po krzywej. W taki sposób można więc na przykład przemieścić punkty odpowiadające brązowi, mosiądzowi i cynkowi nisko w dół, poniżej prawostronnego wybrzuszenia charakterystyki. Miejsce tych punktów, odpowiadających materiałom o średniej konduktywności, zajmą punkty przyporządkowane materiałom o małej konduktywności (grafit, stal nierdzewna itp.).

Dobór odpowiedniej częstotliwości pomiarowej ma jeszcze inny aspekt, związany z wpływem na wynik pomiaru szczeliny między cewką i materiałem badanym (efekt "lift-off"). Uniesienie cewki ponad badany materiał powoduje zmniejszenie sprzężenia między cewką i obiektem, w rezultacie powiększenie składowej indukcyjnościowej wL, i w innym stosunku zmniejszenie składowej rezystancyjnej R'. Punkt odpowiadający mierzonej konduktywności przesuwa się więc w górę, ale po innej trajektorii niż trajektoria konduktywności. Załóżmy, że w wyniku pomiaru otrzymaliśmy punkt odpowiadający konduktywności czytego aluminium (σ = 36 MS/m), przy częstotliwości 2 kHz i cewce ściśle przyłożonej do materiału - jak na rys. 4a. Połączmy ten punkt prostą z punktem P, odpowiadającym pustej cewce. Punkt P reprezentuje tym samym sytuację, jaka powstaje przy całkowicie uniesionej cewce. Wspomniana prosta określa kierunek wpływu uniesienia cewki od punktu "czyste aluminium" do punktu P, i jest przybliżonym miejscem geometrycznym położenia końca wektora impedancji przy unoszeniu cewki. Warto zauważyć, że rzeczywistym miejscem geometrycznym jest płaski łuk narysowany linią przerywaną, dla którego prosta stanowi cięciwę. Jeśli na tej prostej (lub łuku) wyznaczymy doświadczalnie nieliniową skalę z działkami np. co 0,25 mm, to okaże się, że wysokość uniesienia przekraczającą 2 mm odpowiada w istocie sytuacji cewki umieszczonej w powietrzu. Nawet więc bardzo małe uniesienie cewki może spowodować znaczny błąd w odczycie konduktywności.

Pewne uniezależnienie się od wpływu uniesienia cewki można uzyskać, jeśli kierunek wpływu uniesienia i kierunek zmiany konduktywności (ściśle: stycznej do charakterystyki konduktywności w danym punkcie) tworzą kąt około 90°. Jest to tzw. kąt separacji 0. Im bliższy jest on 90⁰, tym mniejszy wpływ na wynik pomiaru ma uniesienie cewki. Na rys. 4b, odpowiadającym pomiarowi składowych impedancji przy 20 kHz, kąt 0 przy czystym aluminium jest bliski 90°, dla brązu wynosi on natomiast około 30⁰. Jak można łatwo zauważyć, kąt $heta
ightarrow 90^{\circ}$ otrzymuje się dla punktów pomiarowych leżących poniżej prawostronnego wybrzuszenia charakterystyki, do tych więc okolic krzywej należy sprowadzić interesujące nas punkty. Można to osiągnąć przez podwyższenie częstotliwości pomiarowej. Na przykład na rys. 4c przedstawiono charaterystykę dla przypadku, gdy cewka pomiarowa jest zasilana prądem o częstotliwości 200 kHz. Kat separacji 0 przy punkcie pomiarowym dla brązu wykazuje teraz wartość około 70°. Przeprowadzone rozumowanie jest poprawne tylko dla małych przyrostów (uniesienie ≤ 0,05÷0,1 mm). Ponadto dążenie do powiększania kąta separacji na drodze podwyższania częstotliwości powoduje zbytnie zagęszczenie punktów pomiarowych w dolnej części krzywej (rys. 4c). Jednocześnie efekt

Zastosowanie prądów wirowych....

naskórkowości sprawia, że prądy wielkiej częstotliwości penetrują tylko bardzo cienką warstwę powierzchniową badanego elementu.

Opisane zjawisko wpływu uniesienia cewki pomiarowej może być praktycznie wykorzystane przy nieniszczącym pomiarze grubości nieprzewodzących powłok (np. warstwy lakieru) na podłożu metalicznym.

Jak juž wspomniano, na wynik pomiaru składowych impedancji cewki, a więc także na pomiar konduktywności, może mieć również wpływ grubość badanego elementu. Jeśli więc nie będzie zachowany warunek jego znacznej grubości - np. będzie ona porównywalna z głębokością wnikania prądu (3) - wówczas wartości $\omega L'_1$ i R'_1 będą zależeć jednocześnie od konduktywności i grubości badanego materiału. Ilustruje to, zdjęta doświadczalnie, rodzina krzywych mieszcząca się po prawej stronie, zaznaczonej grubą linią, podstawowej krzywej miejsc geometrycznych końca wektora impedancji (przy zmianie konduktywności) - jak na rys. 4c. Można zauważyć, że dla określonej, stałej grubości i różnych konduktywności materiału otrzymamy nowe, bardziej wypukłe krzywe miejsc geometrycznych (cienkie linie krzywe). Łącząc z kolei ze sobą punkty odpowiadające różnym grubościom, ale temu samemu materiałowi, otrzymamy rodzinę charakterystyk (linie przerywane), które mogą stanowić podstawę do budowy przyrządów do pomiaru grubości metalowych folii, blach itp.

Rozwiązanie układowe wiroprądowych konduktometrów, mierników grubości niemetalicznego pokrycia lub grubościomierzy folii metalowych – może być różne, zawsze jednak u podstawy ich działania leży pomiar składowych impedencji cewki stykowej.

4. DEFEKTOSKOPIA WIROPRADOWA

Mała głębokość wnikania prądów wirowych, będąca niewątpliwie pewną niedogodnością w konduktometrii, staje się zaletą w przypadku defektoskopii wiroprądowej, gdyż uzupełnia i rozszerza do warstw przypowierzchniowych obszary penetracji niedostępne między innymi dla metod ultradźwiękowych.

Przykładem rozwiniętych ostatnio wiroprądowych metod defektoskopowych może być badanie jednorodności elementów walcowych (prętów, drutów, rur itp.) z metali nieferromagnetycznych za pomocą tzw. sond różnicowych. Sonda różnicowa - np. typu transformatorowego - stanowi układ złożony z trzech cewek; jednej cewki wzbudzającej i dwóch cewek pomiarowych umieszczonych na wspólnej osi z badanym elementem, przesuniętych względem siebie na stałą niewielką odległość i połączonych różnicowo. Cewka wzbudzając jest zasilana prądem

zmiennym o stałej częstotliwości (10 kHz ... 100 kHz). Sondę taką i jej schemat połączeń przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Sonda różnicowa do defektoskopii wiroprądowej nieferromagnetycznych elementów walcowych

a) budowa sondy, b) schemat połączeń

 L_1 - cewka wzbudzająca (pierwotna), L'_2 , L''_2 - cewki wtórne połączone różnicowo Fig. 5. Difference probe for eddy current defectoscopy with nonferromagnetic cylinder elements

a) probe construction, b) scheme of junctions

 L_1 - primary coil, L'_2 i L''_2 - secondary coil joined differentially

Jeżeli sonda jest pusta lub jest wypełniona materiałem przewodzącym o jednolitej strukturze i bez wad, to napięcia wzbudzane w obu cewkach pomiarowych są sobie równe co do bezwzględnej wartości, lecz przesunięte względem siebie o 180° i w rezultacie wyjściowy sygnał różnicowy jest równy zero. Ilustrują to rys. 6a i 6b. Wprowadźmy teraz do sondy niejednorodny, np. zawierający wadę, element. Załóźmy przy tym, że wada znajduje się w obszarze działania tylko jednej cewki pomiarowej - np. pierwszej - podczas gdy w drugiej cewce będzie się znajdować ten sam materiał pozbawiony nieciągłości. W takim przypadku gęstość i rozkład prądów wirowych w obu odcinkach badanego materiału będą różne. Różne także będą pod względem amplitudy i fazy napięcia indukowane w obu cewkach pomiarowych. Sytuację taką ilustruje rys. 6c. Wyjściowy sygnał różnicowy będzie więc teraz różny od zera, co pozwala wnioskować o istnieniu nieciągłości - np. wady. Będzie to więc stwierdzenie typu jakościowego, nie ilościowego. Dodatkową informację na temat wady możemy przy



Rys. 6. Wykresy wektorowe napięć indukowanych w uzwojeniach wtórnych sondy różnicowej

a) sonda pusta, b) sonda wypełniona metalem nieferromagnetycznym o strukturze jednorodnej, bez wad, c) sonda wypełniona materiałem z wadą pod cewką L'

Fig. 6. Vector graphs of induced voltages for secondary coils of difference probe

a) empty probe, b) probe with nonferromagnetic metal with isotropic structure without failures, c) probe with metal with a failure under the coil L_2'



 Rys. 7. Sygnały uzyskiwane z sondy różnicowej przy stałoprędkościowym przemieszczaniu elementu badanego z wadą w postaci
 a) otworu i b) podłużej szczeliny równoległej do osi

Fig. 7. Signals found in the difference coil under displacement with constant speed of the element with a failure in the form a) a hole, b) longitudinal gap parallel to the axis

Zastosowanie prądów wirowych...

pewnym doświadczeniu uzyskać badając amplitudę i fazę sygnału, korzystając przy tym z próbek z wadami wzorcowymi.

Znaczne udoskonalenie metody uzyskuje się jednak przez wprowadzenie nowego czynnika w postaci modulowania sygnału różnicowego przez przemieszczanie sondy względem badanego elementu. Przyjmując stałą prędkość przemieszczania sondy osiąga się to, że kształt różnicowego napięcia wyjściowego, a więc jego zmiana wywołana przemieszczaniem sondy, staje się funkcją położenia, wymiarów geometrycznych, kształtu, jednorodności i innych cech wady lub ogólniej, nie-







Rys. 8. Przykład uzyskanej na ekranie monitora lub oscyloskopu krzywej dwulistkowej przy stałoprędkościowym przemieszczaniu elementu badanego wzdłuż osi sondy różnicowej

Fig. 8. An example of twofolial curve obtained on the screen of monitor or oscilloscope under displacement with constant speed of the element tested along the axis of the difference probe

ciągłości. Dwa przykłady takich sygnałów uzyskiwanych z wad różnego kształtu pokazano na rys. 7.

Jak wynika z rysunku 7, zmiana napięcia wyjściowego w funkcji położenia sondy ma charakter odkształconego przebiegu okresowego. Analiza takiego przebiegu w szczególności z punktu widzenia powiązania jego parametrów z określonymi parametrami materiału, a więc także jego wad, może być przeprowadzona w sposób różnoraki. Jednym z takich sposobów jest przedstawienie na płaszczyźnie zespolonej trajektorii zmian napięcia różnicowego przy przemieszczaniu sondy. Uzyskuje się to na drodze układowej i z reguły przy użyciu komputera. Rozkładając różnicowy sygnał wyjściowy, uzyskany za okres pełnego przemieszczenia sondy, w szereg Fouriera i biorąc pod uwagę określoną liczbę składowych harmonicznych (w rzutach na oś liczb rzeczywistych i oś liczb urojonych) otrzymujemy charakterystyczny obraz na ekranie monitora. Dla sondy różnicowej jest to zamknięta pętla dwulistkowa przypominająca odkształconą lemniskatę (rys. 8). Z jej kształtu, wymiarów i powierzchni listków, kąta położenia głównej osi itp. można wnioskować o rodzaju nieciągłości, ukrytych wadach itp. Pętla przedstawiona na rysunku może być więc scharakteryzowana "amplitudą listka" A, kątem fazowym 🦞 i rozwartością stycznych. Parametry te są przynajmniej w pewnym zakresie związane z wadą materiału, którą reprezentuje petla.

5. METODY PRZEZNACZONE DO SORTOWANIA

Do sortowania gotowych wyrobów stalowych mogą być stosowane metody wiroprądowe wykorzystujące opisane wcześniej właściwości tego typu badań w powiązaniu ze zmianą własności magnetycznych materiału. Układami pomiarowymi są tzw. mostki sortujące. Zasadniczym ich przeznaczeniem jest porównywanie stalowych wyrobów wytwarzanych seryjnie, mających mało skomplikowane (np. cylindryczne) kształty z podobnymi elementami wzorcowymi. Porównanie odbywa się głównie ze względu na istnienie przypowierzchniowych wad, istnienie zmian struktury i związanej z nią twardości powierzchni wyrobu lub rzadziej, w celu kontroli tolerancji wymiarów. Mostkiem sortującym jest najczęściej zmodyfikowany mostek Maxwella, np. w układzie przedstawionym na rys. 9.

Dwa ramiona mostka są utworzone ze stałych rezystancji R_1 i R_2 , dwa pozostałe z odpowiednio uzwojonych cewek L_1 i L_2 , tak wykonanych, że można do nich wkładać element badany i wzorcowy. Wskażnikiem równowagi mostka jest oscyloskop. Do płytek odchylenia pionowego doprowadzone jest wzmocnione na-





pięcie wyjściowe mostka, do płytek odchylenia poziomego napięcie sinusoidalne o częstotliwości równej częstotliwości zasilania mostka. W celu uzyskania znacznej głębokości penetracji prądów wirowych wzbudzanych w elementach badanych stosowana jest mała częstotliwość (np. częstotliwość sieciowa 50 Hz). Mostek doprowdza się do równowagi (za pomocą elementów równoważących R_3 i R_4) tylko dla częstotliwości podstawowej napięcia zasilającego. Prócz prądów o tej częstotliwości, wskutek nieliniowych charakterystyk magnesowania i histerezy elementów stalowych, w mostku powstają (w dolnej gałęzi z cewkami L₁ i L₂) prądy harmoniczne.

Jeżeli elementy stalowe badane w mostku różnią się między sobą, to ich charakerystyki magnesowania (pętle histerezy) również się różnią i mostka nie można sprowadzić do równowagi na wyższych harmonicznych. Prąd magnesowania stali zawiera, jak wiadomo, szczególnie dużą trzecią harmoniczną, a więc przy zasilaniu mostka o częstotliwości sieciowej i po doprowadzeniu go równowagi dla tej częstotliwości, na zaciskach wyjściowych – przy różniących się elementach badanych – pojawia się napięcie nierównowagi dla trzeciej harmonicznej i wyższych nieparzystych harmonicznych. Ze złożenia napięć o częstotliwości 50 Hz i 150 Hz (oraz wyższych nieparzystych harmonicznych) na ekranie oscyloskopu otrzymuje się charakterystyczną trójpętlową krzywą Lissajous (rys. 10). Parametry tej pętli mogą stanowić podstawę do oceny różnic między elementem badanym i wzorcowym.



Rys. 10. Typowa krzywa Lissajous uzyskiwana na ekranie oscyloskopu w mostku sortującym, przy badaniu elementów stalowych

Fig. 10. Typical Lissajous curve obtained on the oscilliscope screen in the sorting bridge, when steel elements are tested

LITERATURA

- Zagajewski T., Malzacher S., Kwieciński A.: Elektronika przemysłowa.
 WNT, Warszawa 1975, rozdz. 5: Badania nieniszczące materiałów, s.306-346.
- [2] Hagemaier D.J.: Eddy Current Impedance Plane Analysis. Materials Evaluation 41, February 1983, s. 211-218.
- [3] McMaster R.C., McIntire P., Mester L.M. (Editors). Nondestructive Testing Handbook, vol. 4. American Society for Nondestructive Testing. N. York 1986.
- [4] Konduktometria wiroprądowa wspomagana komputerowo (Grupa tematyczna VII; CPBP 02.20: Wybrane zagadnienia podstawowych problemów współczesnej metrologii oraz technologii i konstrukcji systemów i urządzeń pomiarowokontrolnych). Instytut Elektroniki Politechniki Śl. Pr. zbior. pod kier. S. Malzachera. Raporty I-V z lat: 1986-1990, Warszawa-Gliwice 1990.
- [5] Horne D., Udpa S., Lord W.: Superposition of Eddy Current Probe Signals. Materials Evaluation (42), June 1984, s. 930-933.

- [6] DIN 54141. Wirbelstromprufung von Rohren. Teil 1: Allgemeines zur Prufung mit Durchlaufspulen nach der Einfrequenzmethode. October 1982, s.310-312.
- [7] Malzacher S.: Mostek Maxwella o nieliniowych indukcyjnościach. ZN Pol. Śl., seria: Automatyka, z. 7; Gliwice 1966, s. 75-100.

Recenzent: Prof. RNDr JindFich FOREJT

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1990 r.

Abstract

Eddy current methods of non-destructive testing (including some kinds of measurement of various physical quantities) make use of interaction between an external primary electromagnetic field and a secondary electromagnetic field, associated with eddy currents generated by the primary field. If this process takes place in an electrically conducting non-ferromagnetic or ferromagnetic medium, it can be used under some specified conditions for testing properties of the medium. The primary variable electromagnetic field is generated by a coil of an appropriate design. The density of eddy currents induced by the coil depends, in particular, on the object geometry, kind of material and distance between the object and the coil. The electromagnetic field generated by eddy currents affects the measuring coil (probe) and induces electromotive force in it, changing at the same time the components of the impedance of the coil. Measuring the electromotive force or the components of the impedance makes it possible to draw conclusions, generally speaking, about properties of the test medium. The measured quantities depend, however, on many variables, while, from the point of view of the measurement correctness, we are only interested in one precisely defined relation. This fact is an advantage and a disadvantage of eddy current methods at the same time, since it is possible to analyse the influence of a particular parameter damping simultaneously the influence of remaining quantities. The recognition of physical processes taking place in the "measuring coil-test material" system can be based on the results of an appropriate experiment or on the analysis of the mathematical model of the system. The latter case has become popular lately due to the implementation of computers. The more precise the model is, the more thorough the analysis can be. The paper presents the

S. Malzacher

foundations and methods used for this purpose. One of such methods has been the basis for designing (research programme CPBP 02.20) a series of instruments for non-destructive measurement of conductivity of non-ferromagnetic metals and their alloys. The eddy current method can also be applied for dimensional control of metal products or surface flaw detection in these products. The latter application is a typical non-destructive test, which is in a sense complementary to ultrasonic testing. It is generally known that ultrasonic testing is of little use for detecting flaws which are situated within a small distance from the surface of the test product.

A large variety of applications of eddy current methods for non-destructive testing causes that new possibilities and areas of application have been still discovered despite the fact that these methods have been known for over 50 years.