

ZBROWSKI Andrzej, MATECKI Krzysztof

## ZASTOSOWANIE METODY PRĄDÓW WIROWYCH W DIAGNOSTYCE MATERIAŁÓW I ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono zastosowanie metody prądów wirowych w nieniszczących badaniach diagnostycznych materiałów i elementów konstrukcyjnych. Omówiono efekt powstawania prądów wirowych w materiale będącym pod działaniem zmiennego pola elektromagnetycznego. Przedstawiono ogólną charakterystykę metody oraz jej zastosowanie poparte przykładami.*

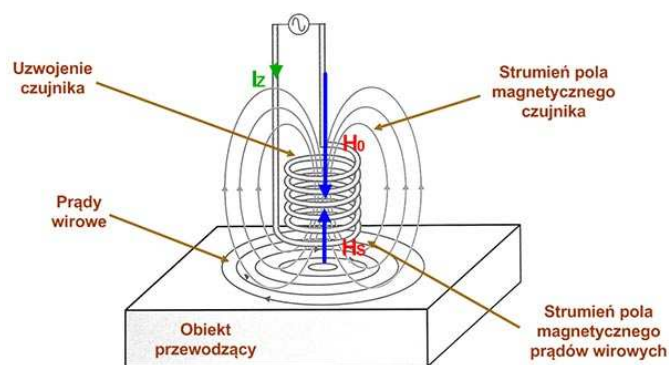
### WSTĘP

Metoda prądów wirowych (EC Eddy Current) jest jedną z najbardziej skutecznych metod wykrywania i oceny wad powierzchniowych i podpowierzchniowych różnego rodzaju, szczególnie wad zmęczeniowych i korozyjnych elementów konstrukcyjnych powstałych w trakcie eksploatacji. Znalazła szerokie zastosowanie w badaniach materiałów i obiektów przewodzących prąd elektryczny zarówno ferrowe jak i nieferromagnetycznych oraz materiałów kompozytowych. Badaniom i kontroli poddawane są przede wszystkim stale ferrytyczne, i austenityczne, a więc stale o różnych strukturach oraz właściwościach elektromagnetycznych, a także miedź i jej stopy, aluminium i jego stopy, tytan i stopy tytanu, Inconel 600, hastelloy, monel, cyrkon oraz inne metale np. wolfram czy molibden. Mimo, że należy do powierzchniowych, nieniszczących metod badawczych wykrywa z powodzeniem nieciągłości ukryte w warstwach wierzchnich materiałów, nieciągłości pod pokryciami malarskimi, galwanicznymi, a także znajdujące się w warstwach kompozytowych obiektów wielowarstwowych [6]. Dużo skuteczniejsza od metod wizualnych, penetracyjnych czy magnetycznych, nie wymagająca stosowania dodatkowych ośrodków sprzęgających jest ciągle rozwijana i coraz częściej stosowana w produkcyjnych systemach kontroli wytwarzania materiałów i elementów konstrukcyjnych, jak również w badaniach diagnostycznych w różnych sektorach przemysłowych, takich jak: lotnictwo, przemysł maszynowy, przemysł hutniczy, w elektrowniach jądrowych i konwencjonalnych, w przemyśle chemicznym, rafineryjnym, cukrowniczym, papierniczym i spożywczym.

### 1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA

Metoda wiroprądowa (oparta na zjawisku indukcji magnetycznej) polega na wzbudzaniu zmiennego pola elektromagnetycznego w badanym materiale oraz odbieraniu reakcji materiału na takie działania [13]. Zmienne pole magnetyczne generowane przez sondy pomiarowe zasilane zmiennym prądem elektrycznym sprawia, że w obiekcie badanym indukuje się zmienne wirowe pole elektryczne. Napięcie tego pola to siła elektromotoryczna SEM powodująca w materiale przewodzącym przepływ prądu elektrycznego. Cyrkulacja

wektora natężenia pola elektrycznego sprawia, że pole prądów rozplywa się po zamkniętych ścieżkach (stąd nazwa prądy wirowe), prostopadle do wektora indukcji magnetycznej. Pole prądów wirowych wytwarza również zmienne pole magnetyczne zależne między innymi od własności elektrycznych (przewodności) i magnetycznych (przenikalności) obiektu (materiału), jego wymiarów oraz występujących w obiekcie wad makro i mikrostruktury (nieciągłości). Rozptyw wytwarzanego pola w materiale zależy od mikrostrukturalnych i makrostrukturalnych własności materiału, a więc od rodzaju struktury metalograficznej, wytrzymałości, twardości, występowania wtrąceń, segregacji, pęknięć i innych wad materiałowych i odbywa się po ścieżkach „najlepszej przewodności”, których przebieg zostaje zaburzony, gdy w strefie oddziaływania pola znajduje się wada [4]. Powoduje ona zmianę rozkładu pola prądów wirowych na skutek lokalnej zmiany przede wszystkim przewodności elektrycznej oraz w przypadku obiektów ferromagnetycznych - przenikalności magnetycznej. Zmiany wartości prądów wirowych oddziałują na pierwotne pole magnetyczne cewki. Otrzymywane z przetwornika lub sondy sygnały są analizowane w aparacie wiroprowym i informują o zmianach własności badanego obiektu. Na rysunku 1 przedstawiono schemat ilustrujący ideę metody.



**Rys. 1.** Schemat ilustrujący efekt prądów wirowych dla cewki zewnętrznej.  $H_0$  – pole wzbudzone przez cewkę,  $H_s$  – pole wytwarzane przez prądy wirowe.

Źródło: [5]

Pomiar zmiany pola magnetycznego wywołanego zaburzeniem w przepływie prądów wirowych dokonywany sondami wiroprowymi rejestrowany jest przez defektoskop, a sygnał zaburzenia zobrazowany na płaszczyźnie impedancji elektrycznej w zależności od rozmiaru uszkodzenia. Analiza zarejestrowanych zmian pola elektromagnetycznego pozwala na ocenę stanu badanego materiału, występujących wad w postaci np.: wtrąceń, pęcherzy, zażużeń, pęknięć, ubytków erozyjnych lub korozyjnych, ocenę ich wielkości oraz głębokości. Jest to metoda porównawcza i wymaga odniesienia do wzorca - próbki odniesienia wykonanej z materiału o właściwościach takich jak badany obiekt, wolnej od niejednorodności składu i struktury, wad pochodzenia mechanicznego, nieciągłości materiałowych oraz wtrąceń niemetalicznych, identycznie obrabianej cieplnie lub cieplno-chemicznie. Próbkę odniesienia winna mieć również tę samą geometrię co obiekt lub badany jego fragment [18, 19]. Metoda prądów wirowych szeroko stosowana w badaniach nieniszczących materiałów, które są przewodnikami prądu elektrycznego, a zatem metali i stopów ferromagnetycznych oraz nieferromagnetycznych (nieżelaznych) przeznaczona jest do ujawniania powierzchniowych i podpowierzchniowych wad głównie w postaci pęknięć (eksploatacyjnych i produkcyjnych) i wtrąceń na obiektach o prostym i złożonym kształcie. Daje możliwość realizacji badań bezkontaktowych, zwłaszcza elementów w obiektach wielowarstwowych. Czułość metody zależna jest w głównej mierze od głębokości penetracji pola prądów wirowych. Wraz ze

wzrostem głębokości badania zmniejsza się wartość wektora indukcji magnetycznej, a więc i związane z tym natężenie pola prądów wirowych. Z uwagi na ten fakt przyjęto, iż efektywną głębokością penetracji (zwaną standardową głębokością penetracji) będzie głębokość, gdzie spadek natężenia pola prądów wirowych będzie równy 37% wartości natężenia pola prądów wirowych na powierzchni badanego materiału [4].

Zależność pozwalająca na wyznaczenie standardowej głębokości penetracji ma postać [12]:

$$D_p = 50 * \sqrt{\frac{172.41}{\mu * f * \delta}}$$

gdzie:

$D_p$  – standardowa głębokość penetracji (wnikania) [mm];

$\mu$  - przenikalność magnetyczna badanego materiału;

$\delta$  - przewodność elektryczna badanego elementu [% IACS] (IACS – ang. International Annealed Copper Standard – Międzynarodowy Standard Miedzi Wyżarzanej).

Obliczona dzięki tej zależności głębokości badania pozwala na określenie: warstwy obiektu objętej badaniem, wykrywanych defektów (powierzchniowe, podpowierzchniowe) oraz na regulację czułości badania.

Badanie defektoskopowe prądami wirowymi może być stosowane dla wszystkich materiałów metalowych takich jak: stale węglowe, stale nisko i wysokostopowe, narzędziowe, żeliwa, metale kolorowe i ich stopy, a więc wszystkich materiałów przewodzących prąd elektryczny. Wykrywa nie tylko wady w postaci: pęknięć zmęczeniowych, pęknięć korozji międzykrystalicznej i naprężeniowych, lecz również zmiany strukturalne spowodowane oddziaływaniem wysokiej temperatury (obróbka cieplno - chemiczna) czy przypalenia szlifierskie.

Podstawowe zalety metod badania prądami wirowymi to [11]:

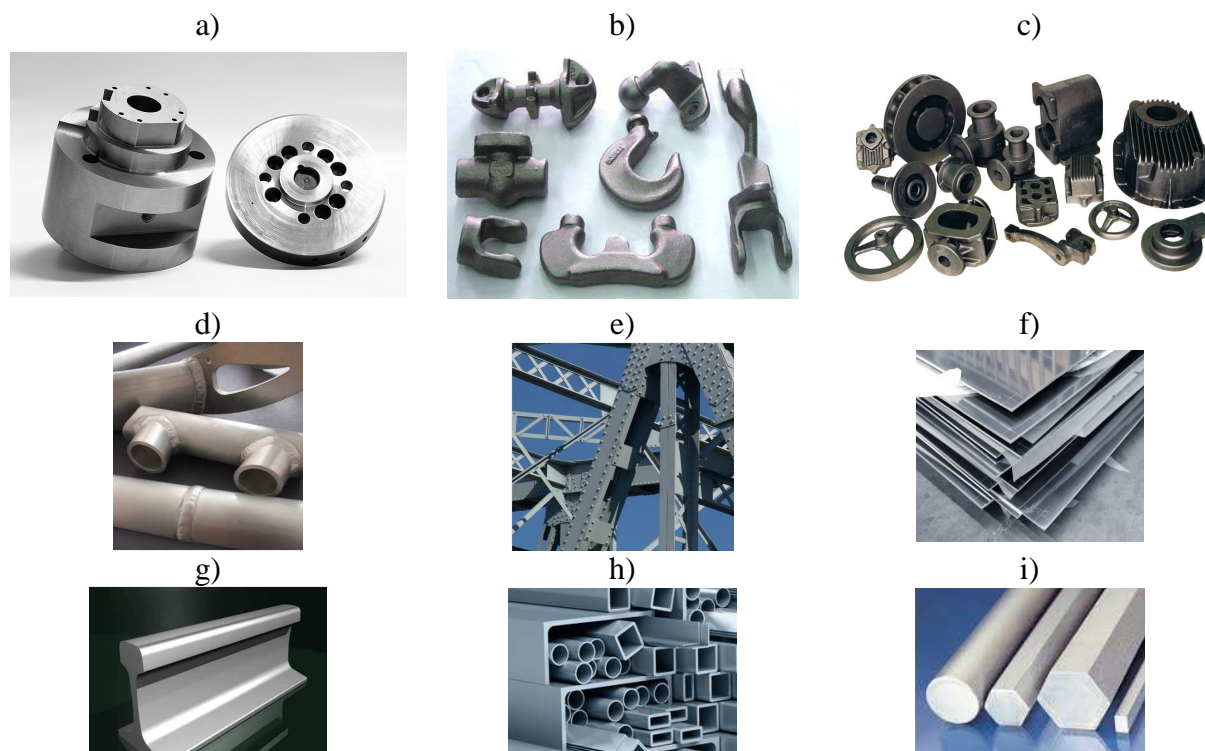
- bardzo wysoka wiarygodność badań,
- bardzo wysoka czułość badania,
- duża szybkość interpretacji wyników,
- możliwość badania wszystkich metali,
- badanie może się odbywać bez usuwania powłok ochronnych,
- brak konieczności stosowania środka sprzęgającego pomiędzy sondą a powierzchnią,
- badania w dużej mierze bezkontaktowe,
- możliwość badania poprzez powłoki metaliczne inne niż materiał podłoża: cynk, aluminium, tytan, cyrkon, stal stopowa,
- brak ograniczeń z powodu złych warunków pogodowych, jak np. podczas badań penetracyjnych lub magnetycznych,
- brak ograniczeń z powodu słabych warunków oświetleniowych,
- możliwość prowadzenia badań podwodnych,
- brak zagrożeń radiologicznych.

## 2. ZASTOSOWANIE METODY

Z uwagi na posiadane cechy metoda EC znalazła zastosowanie w następujących obszarach:

- badań defektoskopowych obiektów metalowych w trakcie technologicznych procesów wytwarzania (kontrola jakości wyrobów i półwyrobów - obecność wad powierzchniowych i podpowierzchniowych),

- badań konstrukcyjnych materiałów metalowych produkowanych w hutach w różnych asortymentach (wady materiałowe i strukturalne, nieciągłości, orientacja i wielkości wady),
- diagnostycznych badań defektoskopowych stanu technicznego części maszyn i urządzeń w trakcie ich eksploatacji,
- badań strukturoskopowych takich jak:
  - pomiar zawartości fazy ferrytu delta w stali,
  - pomiar twardości części obrabianych cieplnie: wałków, tulei, kół zębatych,
  - pomiar grubości warstwy nawęglanej,
  - pomiary zmian struktury w materiałach napromieniowanych,
  - badania materiałów radioaktywnych bez ryzyka powstania skażeń,
  - pomiar grubości i stopnia dyfuzji warstw napyłanych plazmowo,
  - pomiar jakości i grubości warstw dyfuzyjnych,
  - określenia jakości powierzchni regenerowanych poprzez napawanie,
- pomiarów:
  - przewodności elektrycznej metali nieferromagnetycznych,
  - grubości powłok metalowych i niemetalowych na obiektach metalowych,
  - grubości taśm i folii oraz grubości niektórych powłok i warstw.



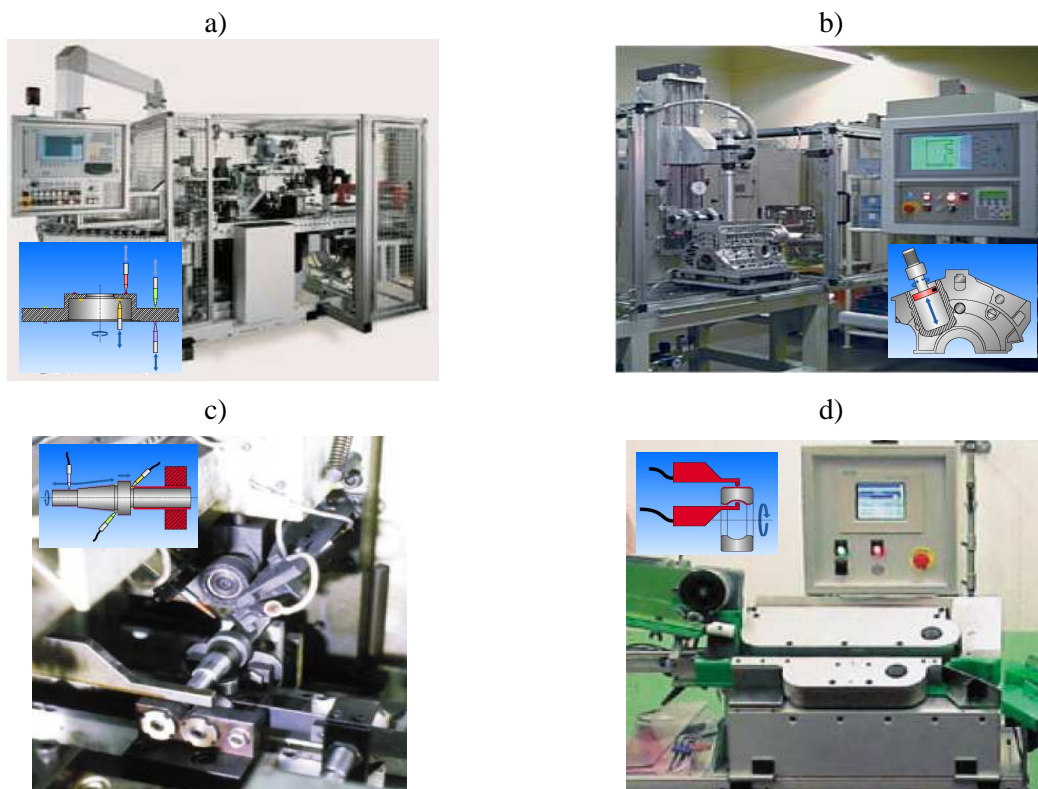
**Rys. 2.** Przykładowe elementy metalowe dla których badania defektoskopowe metodą prądów wirowych prowadzone są w trakcie technologicznych procesów wytwarzania lub eksploatacji: a) elementy wykonane obróbką skrawaniem, b) odkuwki, c) odlewy, d) elementy i konstrukcje spawane, e) konstrukcje nitowane, f) blachy, g) szyny, h) kształtowniki, i) pręty.

**Źródło:** a) <http://mech-masz.com/galeria-produktow/galeria-cnc-rozne/>, b) <http://www.wostal.pl/galeria.html>, c) <http://www.fpspomax.home.pl/www/index.php/blog/itemlist/date/2012/11>, d) <http://www.copal.com.pl/obrobka-aluminium/>, e) <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=669910&page=17>, f) <http://www.beginstal.pl/p,blachy,13.html>, g) <http://www.ru.all.biz/pl/szyny-kolejowe-kolei-szerokiej-g189840>, h) <http://rolstal.com/pl/Wyroby-hutnicze>, i) <https://bth.pl/produkty/prety/>.

Stosowana do badania wszystkich materiałów przewodzących prąd elektryczny, czyli metali, umożliwia kontrolę defektoskopową obiektów w postaci części maszyn obrabianych mechanicznie, odlewów, odkuwek, wyrobów przerabianych plastycznie, prętów, kształtowników, szyn, drutów, blach, rur, spoin (rysunek 2.) - realizowaną poprzez diagnostyczne badania ręczne lub w zautomatyzowany sposób na liniach produkcyjnych.

Kontrola jakości obiektów z wykorzystaniem metody prądów wirowych jest wdrażana na wielu etapach produkcji począwszy od kontroli materiału wyjściowego w postaci kęsów, prętów, rur, drutów czy blach, poprzez półfabrykaty (półwyroby), a skończywszy na kontroli wyrobów gotowych w postaci elementów lub zespołów.

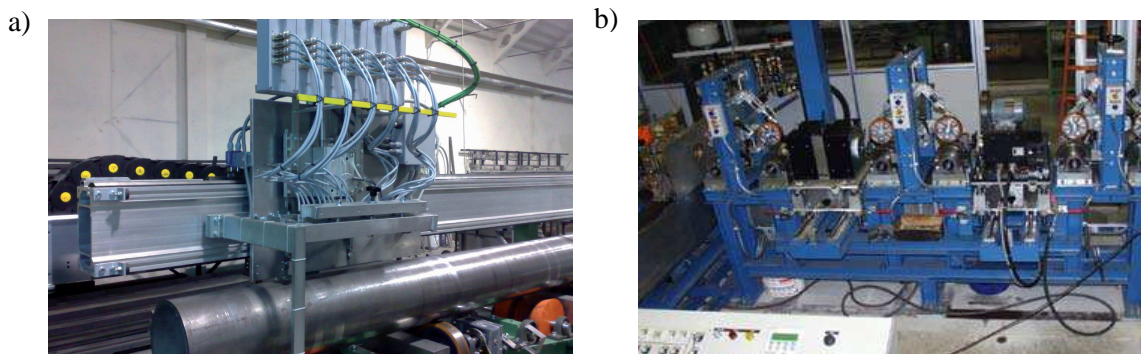
Wykorzystanie metody w systemach kontroli wytwarzania uwidacznia się w przemyśle samochodowym, gdzie kontrola defektoskopowa materiałów części szczególnie odpowiedzialnych, o skomplikowanym kształcie i wykonaniu staje się koniecznością. Systemy te kontrolują materiały elementów silników spalinowych (tuleje cylindrowe, gniazda zaworowe, grzybki zaworowe, popychacze, wałki rozrządu, korbowody, tłoki, itp.), elementy zawiesznień, piasty kół, tarcze i bębny hamulcowe. Wydajność kontroli z uwagi na seryjny charakter produkcji w tym sektorze przemysłowym kształtuje się w granicach od kilku do kilkunastu sztuk na minutę. Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe zastosowania metody prądów wirowych w praktyce. Proponowane systemy składają się z defektoskopów współpracujących z różnego rodzaju przetwornikami (sondami), które w zależności od badanych obiektów mogą funkcjonować samodzielnie lub wielokrotnie w postaci np.: głowic wiroprowadzących przelotowych obejmujących, stykowo- obrotowych lub przelotowych wewnętrznych.



**Rys. 3.** Zastosowanie metody prądów wirowych w produkcyjnych systemach badań nieniszczących firmy INSTITUT DR. FOERSTER GmbH & Co.KG.: a) tarcz hamulcowych, b) tulei bloków silników spalinowych, c) czopów osadczych łożysk w wałach, d) bieżni łożysk tocznych.

Źródło: [13]

Metoda prądów wirowych stosowana jest w automatycznych systemach nieniszczącej kontroli materiałów w hutnictwie. Są one wdrażane w liniach produkcyjnych m.in. rur, drutów, prętów, kształtowników, płyt, umożliwiając wykrywanie i rozpoznawanie rodzajów wad, ocenę jakości produktów, analizę trendów ich jakości oraz 100%-ową kontrolę produkcji. W kontrolowanych asortymentach wyrobów hutniczych wykrywają nieciągłości w postaci pęknięć, zawalowań i łusek. Na rysunku 4. przedstawiono przykładowe zastosowania metody prądów wirowych w kontroli materiałów hutniczych.



**Rys. 4.** Zastosowanie metody prądów wirowych w systemach kontroli nieniszczących firmy Rohmann GmbH w przemyśle hutniczym: a) inspekcja dużych rur w linii produkcyjnej (pęknięcia, pory), b) inspekcja prętów stalowych.

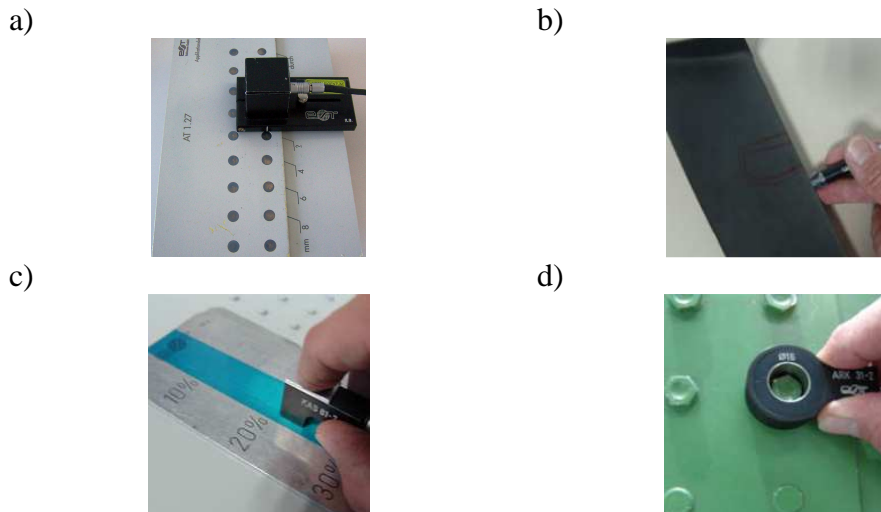
Źródło: [16]

Jako jedna z metod nieniszczących o największej wiarygodności i bardzo wysokiej czułości, metoda wiroprowodowa stosowana jest do diagnostyki stanu technicznego elementów maszyn i urządzeń narażonych w wyniku eksploatacji na awarie spowodowane zmęczeniem materiałów. Celem badań diagnostycznych jest wykrywanie powstałych w czasie eksploatacji defektów, przede wszystkim pęknięć, kontrola własności materiałów, jak identyczność składu, twardość, kontrola wymiarów geometrycznych. W obszarze nieniszczących badań diagnostycznych funkcjonują nadzorowane komputerowo systemy kontroli zawierające w swojej strukturze jednocześnie strukturoskop wiroprowodowy, defektoskop wiroprowodowy oraz urządzenia do pomiarów wymiarów geometrycznych, jak również urządzenia i proste przyrządy do manualnego prowadzenia badań. Ze względu na możliwości oraz wiarygodność wyników funkcjonują w wielu sektorach przemysłowych, znajdując zastosowanie w przemyśle lotniczym, jądrowym, kosmicznym, chemicznym czy szeroko pojętym przemyśle maszynowym, zwłaszcza w obszarach badawczych oraz eksperckich, między innymi do:

- testowania ukrytych pęknięć w nitowanych konstrukcjach aluminiowych,
- kontroli połączeń nitowanych w konstrukcjach blachowych,
- wykrywania pęknięć powierzchni na krawędziach łopatek wirników,
- inspekcji połączeń wielowarstwowych - ukryta korozja,
- inspekcji połączeń śrubowych.

Na rysunku 5. przedstawiono przykłady stosowania "ręcznych" badań wiroprowodowych.

Metoda prądów wirowych jest powszechnie stosowana do badania rur wymienników ciepła, szczególnie w branżach wytwarzających energię, w elektrowniach jądrowych i konwencjonalnych, w przemyśle chemicznym, rafineryjnym, cukrowniczym, papierniczym i spożywczym. Badania te stosuje się do rur wykonanych z materiałów nieferromagnetycznych i nie ma w tym obszarze alternatywnej metody badań nieniszczących.



**Rys. 5.** Zastosowanie metody prądów wirowych w badaniach nieniszczących firmy Rohmann GmbH w przemyśle lotniczym:

- a) kontrola połączeń nitowanych w konstrukcjach blachowych, b) wykrywanie pęknięć powierzchni na krawędziach łopatek - tytan, c) inspekcja połączenia aluminiowego wielopoziomowego - ukryta korozja, d) inspekcja połączeń śrubowych o grubych ścianach - ukryte pęknięcia.

Źródło: [16]

Systemy kontroli tzw. rur zainstalowanych [6] wyposażone są w najnowszej generacji przemysłowe komputery PC. Zintegrowane z pakietami oprogramowania oraz odpowiednimi kartami pomiarowymi w systemy zbierania i analizy sygnału, przetwarzają i zarządzają danymi oraz reprezentują wyniki w postaci map prezentujących ubytki, wygniecenia, rury do wymiany, czy rury do kołkowania. Generowane są również raporty z wynikami kontroli procentowego zużycia rur. Przykład badań wiroprądowych wymiennika ciepła pokazano na rysunku 6.



**Rys. 6.** Zastosowanie metody prądów wirowych w badaniach nieniszczących rur wymiennika ciepła firmy Test Maschinen Technik GmbH.

Źródło: [9]

Innym obszarem stosowania metody jest inspekcja: zbiorników i rurociągów, rur prostych, giętych, kotłowych, żebrowanych, zdalnie sterowana inspekcja w obszarach wysokiego promieniowania lub trudno dostępnych miejscach. Proponowane są także aplikacje do wykrywania korozji z systemami wczesnego ostrzegania przed jej skutkami z zastosowaniem do kadłubów statków, podziemnych zbiorników o dużych średnicach i blachowych konstrukcji spawanych o grubości ścianki do 30 mm, wyposażone w manipulatory pozwalające na ich efektywną kontrolę bez rusztowań. Przykład badań wiroprądowych rur

o dużych średnicach oraz skutków korozji konstrukcji blachowych, zbiorników, kotłów z użyciem manipulatora przedstawiono na rysunku 7.

a)



b)



**Rys. 7.** Zastosowanie metody prądów wirowych w systemach badań nieniszczących firmy Test Maschinen Technik GmbH: a) wiroprądowa inspekcja rur o dużych średnicach w rurociągach przemysłowych oraz wytwórczych, b) kontrola skutków korozji konstrukcji blachowych, zbiorników i kotłów z użyciem manipulatora.

Źródło: [9]

Odrębnym obszarem zastosowania metody prądów wirowych jest inspekcja spoin w konstrukcjach spawanych mająca na celu wykrywanie pęknięć powierzchniowych i leżących pod warstwą powłoki cynkowej lub lakierniczej. Badanie złączy spawanych jest trudne ze względu na złożoną geometrię powierzchni samej spoiny. Sygnał wiroprądowy zawiera zakłócenia pochodzące od nierówności lica spoiny, dlatego istotne znaczenia w takich badaniach ma właściwa kalibracja wykorzystująca próbki odniesienia. Kluczowym jest również właściwy dobór sondy.

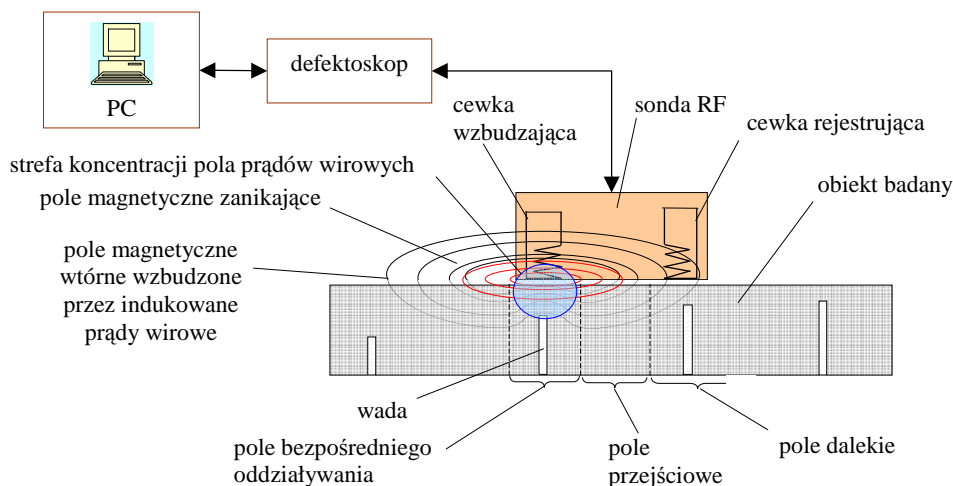
Ciekawym zastosowaniem metody w tym obszarze jest badanie konstrukcji ocynkowanych lub z pokryciem antykorozyjnym. Warstwy będące powierzchnią badania, ze względu na brak określonych własności magnetycznych i zazwyczaj znaczną grubość, są przeszkodą w przeprowadzeniu badań magnetyczno-proszkowych lub penetracyjnych. Miejsca szczególnie wyťažone w konstrukcji mogą być sprawdzane podczas jej eksploatacji poprzez warstwę ocynkowaną lub farbę antykorozyjną bez konieczności jej miejscowego usuwania [10].

Prądy wirowe w znacznym stopniu wykorzystywane są w urządzeniach do oceny: struktur materiałowych, badaniach twardości i wad procesów obróbki cieplnej. Służą tutaj do pomiarów twardości, szacowania zawartości ferrytu, głębokości warstw nawęglanych, azotowanych, strukturalnych, np. zmian cieplnych spowodowanych wyładowaniami atmosferycznymi na poszyciach samolotów lub procesem szlifowania części maszynowych [13].

### **3. BADANIE W POLU DALEKIM - REMOTE FIELD TESTING (RFT)**

W badaniach wiroprądowych penetracja przez prądy jest utrudniona z powodu bardzo silnego tzw. efektu naskórkowości (koncentracji pola prądów wirowych przy powierzchni). Zjawisko to stanowi poważnie ograniczenie stosowania metody w badaniu elementów ferromagnetycznych. Skutecznym rozwiązaniem jest stosowanie metody wiroprądowej badania w polu dalekim. Ideę badania przedstawiono na rysunku 8



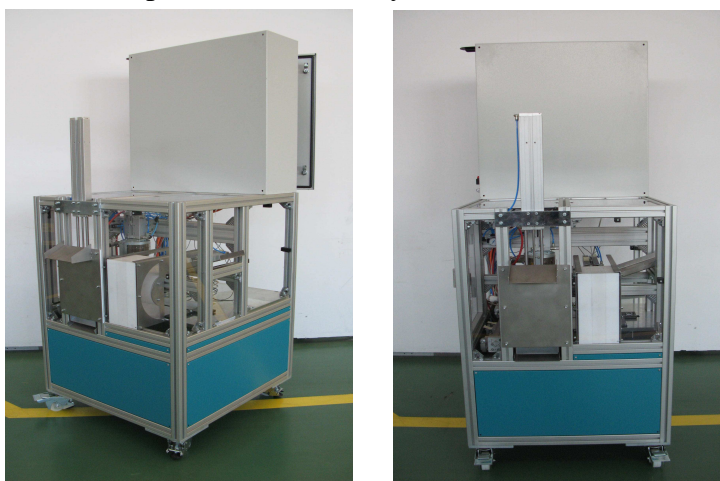


**Rys. 8.** Schemat układu detekcyjno-pomiarowego badania w polu dalekim.

Źródło: [20]

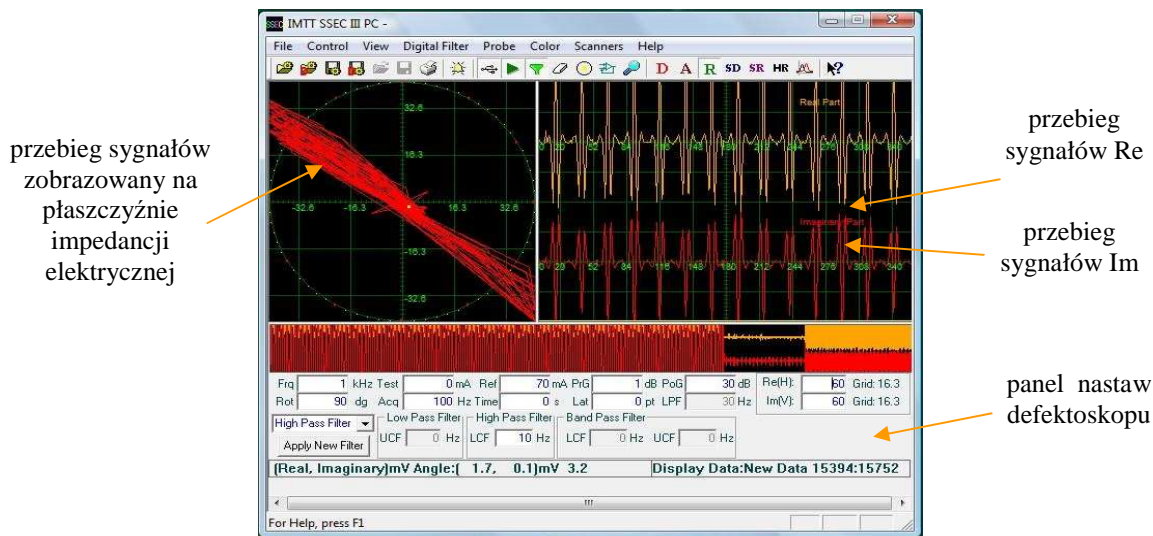
Do generowania prądów stosuje się sondy RF wyposażone w dwie cewki pomiarowe tzw. wzbudzącą i rejestrującą. Cewka rejestrująca jest umieszczona w pewnej odległości od cewki wzbudźczej w obszarze, w którym dominującym polem magnetycznym jest pole od wzbudzonych prądów wirowych. Rejestracja zmian w polu wtórnym pozwala na określanie zmian w badanym materiale [4, 20].

W Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu zaprojektowano i wykonano stanowisko przeznaczone do wykrywania wad materiałowych występujących w pierścieniach łożysk tocznych wyposażone w system detekcji wad metodą pola dalekiego. Urządzenie [8] dedykowane do implementacji w ciągu technologicznym wytwarzania pierścieni łożysk stożkowych pozwoli na wyeliminowanie subiektywnej oceny wzrokowej uniemożliwiającej wykrywanie wad, których ślady nie są widoczne na powierzchni oraz 100%-ową kontrolę produkcji. Widok urządzenia przedstawiono na rysunku 9.



**Rys. 9.** Stanowisko do wykrywania wewnętrznych wad materiałowych w pierścieniach łożysk tocznych.

Zastosowany w urządzeniu wiroprowodowy system detekcji wad w pierścieniach łożysk tocznych składający się z defektoskopu SSEC 3 oraz sond wiroprowodowych GRFEC, rejestruje i analizuje przebiegi sygnałów pochodzących od wad, a następnie wysyła sygnał obecności wady. Przykładowy przebieg sygnałów pochodzących od wad w pierścieniu łożyskowym generowany przez system na ekranie komputera przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Przykładowy przebieg sygnałów od wad w badanym pierścieniu łożyskowym.

#### 4. METODA EFEKTU BARKHAUSENA

Metoda oparta na tym efekcie umożliwia określenie rozkładu naprężeń własnych warstwy wierzchniej w funkcji głębokości. Wykorzystując efekt Barkhausena opracowano wiele głównie laboratoryjnych technik i sposobów badania oraz przyrządów do detekcji i analizy zarejestrowanego sygnału (SEB). Jako metoda jest ciągle jeszcze testowana w laboratoriach. Zbyt niski poziom sygnału wymaga szczególnej precyzji pomiaru, co utrudnia praktyczne zastosowanie metody. Poważnym ograniczeniem przy jej wykorzystaniu jest trudność analizy informacji w zarejestrowanym sygnale. [1, 2, 3, 5, 17]. W ostatnim okresie nastąpił wzrost zainteresowania tą metodą. Podjęto próby systematyzacji i standaryzacji metody pomiaru i analizy sygnału efektu Barkhausena. Powstałe prototypowe rozwiązania doczekały się zastosowania, głównie w przemyśle hutniczym, gdzie oprócz obecnie stosowanych metod: rentgenograficznej i ultradźwiękowej, coraz częściej służą do oceny poziomu naprężeń własnych wyrobów, jakości i skutków obróbki powierzchniowej, stanu warstwy wierzchniej elementów po obróbce, zmian tego stanu w trakcie pracy elementów maszyn, naprężenia w badanym materiale oraz pozwalają na szersze charakteryzowanie mikrostruktury badanych wyrobów [1, 5, 7].

#### PODSUMOWANIE

W grupie podstawowych metod badań nieniszczących, do której należą: badania magnetyczno-proszkowe, penetracyjne, radiograficzne, ultradźwiękowe i wizualne, badania metodą prądów wirowych są wykorzystywane najrzadziej. Stosowanie metody wymaga ogromnej wiedzy i doświadczenia zarówno w prowadzeniu badań jak i interpretacji wyników. Niemniej bardzo duża czułość tej metody oraz wiarygodność wyników badania stawia ją na bardzo istotnej pozycji w metodach stosowanych przez takie przemysły jak: lotniczy, jądrowy, kosmiczny, chemiczny czy maszynowy. Przykładem powszechnego stosowania metody ET są badania eksploatacyjne poszycia samolotów w miejscach: spawanych, na łączeniach nitowanych lub skręcanych, wykrywanie pęknięć w elementach konstrukcjach wielowarstwowych oraz badania części ruchomych. Obserwuje się ciągły wzrost zainteresowania tą metodą i stosowaniem jej zarówno w manualnych, jednostkowych badaniach diagnostycznych, badaniach eksperckich, jak i w przemysłowych badaniach materiałów i wyrobów gotowych, gdzie problemem jest wykrywanie małych uszkodzeń

położonych w materiale pod badanymi powierzchniami na większych głębokościach. Rozwiązaniem problemu może być zastosowanie techniki defektoskopii wiroprądowej wykorzystującej metodę badania w polu dalekim, pozwalającą na głębszą penetrację badanych elementów. Nieodzownym jest jej ciągłe doskonalenie i rozwój zwłaszcza w obszarach technik skanowania, metodyki badawczej, metodyk prowadzenia pomiarów, wzorcowania i kalibracji, oraz procedur identyfikacji, analizy i oceny przebiegów sygnałów prądowirowych.

*Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.*

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Augustyniak B. Nowe osiągnięcia w badaniach nad zastosowaniem efektu Barkhausena do oceny naprężeń własnych. *Badania Nieniszczące*, nr 5, 1996, s. 17-23.
2. Batko, W. Korbiel, T.: Detekcja koncentracji naprężeń metodą szumu Barkhausena. *Problemy Eksploatacji*, nr 3/2005 ISSN 1232-9312, s. 131-142.
3. Błachnio J.: Efekt Barkhausena w diagnostyce elementów maszyn. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2009., ISBN 978-83-7204-742-7.
4. Dragan K., Klimaszewski S., Modern techniques for rapid crack detection in aircraft skin structure, 8 Międzynarodowa Konferencja DIAGNOSTYKA SAMOLOTÓW I ŚMIGŁOWCÓW AIRDIAG 2005, Warszawa, 27 – 28 października 2005
5. Garstka T. System pomiarowy do badań właściwości wyrobów stalowych z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena. *Pomiary Automatyka Robotyka* 6/2008, s. 58-61.
6. Lewińska- Romicka A.: *Badania materiałów metodą prądów wirowych*. Wyd. Biuro Gamma, Warszawa 2007, ISBN 978-83-87848-58-3.
7. Pikosz, H. Waligóra, W.: *Wykorzystanie szumów Barkhausena w diagnostyce warstwy wierzchniej elementów maszyn*. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, ISSN 1642-686X, 2002, Vol. 47, nr 3, s. 51-55.
8. Samborski T., Zbrowski A.: Model stanowiska do wykrywania wewnętrznych wad materiałowych w pierścieniach łożysk tocznych. *Energetyka*, sierpień 2012, str. 447 – 451.
9. Strona internetowa <http://www.eddymax.com/>;
10. Strona internetowa <http://www.e-spawalnik.pl/mozliwosci-badan-konstrukcji-spawanych-metoda-pradow-wirowych-et,301>
11. Strona internetowa <http://www.instytutgamma.com.pl/prady.html>
12. Strona internetowa: [www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org)
13. Strona internetowa <http://www.ndt-net.pl>;
14. Strona internetowa [http://www.ndt-system.com.pl/2\\_fotoET/pdf/CT\\_2011.pdf](http://www.ndt-system.com.pl/2_fotoET/pdf/CT_2011.pdf)
15. Strona internetowa <http://www.profilmag.pl>
16. Strona internetowa [http://www.rohmann.de/p/29\\_25\\_Service-Application-Reports.html](http://www.rohmann.de/p/29_25_Service-Application-Reports.html)
17. Sublik M., Augustyniak B.: Modelling of angular dependence of Barkhausen effect for the biaxial state. 1<sup>th</sup> International Conf. on Barkhausen Noise Micromagnetic Testing. Hannover 1998 pp. 169-188.
18. Wrzuszczak M.: *Wzorce konduktywności dla celów konduktometrii wiroprądowej*. Materiały XXVI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM '94, t. 1, s. 321–328.
19. Wrzuszczak M.: *Wytwarzanie wzorców wad w materiałach przewodzących dla celów diagnostyki wiroprądowej* PAR`2010

20. Zbrowski A., Matecki K.: *Wykrywanie wad podpowierzchniowych metodą prądów wirowych.* XI KONGRES BUDOWY I EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ TECHNICZNYCH, 28 listopada – 1 grudnia 2011 Radom.

## **APPLICATION OF EDDY CURRENT METHODS IN THE DISGNOSTICS OF STRUCTURAL MATERIALS AND COMPONENTS**

### *Abstract*

*This article presents the application of eddy current methods in non-destructive diagnostic tests for structural materials and components. The authors discuss the effect of the formation of eddy currents in a material subject to an alternating electromagnetic field, and give an overview of the method followed by the examples of its application.*

### **Autorzy:**

dr inż. **Andrzej Zbrowski** - Instytut Technologii Eksploatacji Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu, andrzej.zbrowski@itee.radom.pl

mgr inż. **Krzysztof Matecki** - Instytut Technologii Eksploatacji Państwowy Instytut Badawczy w Radomiu, krzysztof.matecki@itee.radom.pl