ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1993
Seria: AUTOMATYKA z. 111 Nr kol. 1180

Zdzisław PAWŁOWSKI
IPPT-PAN, Warszawa

POSTĘPY W ILOŚCIOWEJ OCENIE WYROBÓW NIENISZCZĄCYMI METODAMI ELEKTROMAGNETYCZNYMI

Streszczenie. Nakreślono ogólne tło badań nieniszczących, obszary zastosowań i powiązanie z innymi dziedzinami techniki w szczególności projektowania, wytwarzania i eksploatacji urządzeń. Przedstawiono tendencje rozwojowe i stan aktualny elektromagnetycznych metod kontroli nieniszczącej materiałów i gotowych wyrobów.

PROGRESS IN QUANTITATIVE ASSENSSMENT OF PRODUCTS WITH NON-DESTRUCTIVE ELECTROMAGNETIC METHODS

Summary. General background of non-destructive testing, its areas of application and tasks are described. The connection of non-destructive testing with design, prodcution and utilization processes as well as motivations which form the basis for its progress are stressed. The position of electromagnetic methods and their capabilities of characterizing the state of test material is emphasized.

ПРОГРЕСС В ОБЛАСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ИЗДЕЛИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

Резюме. В статье представлен общий очерк неразрушающего контроля, а также области применения и связи с другими областями техники в особенности с проектированием, изготовлением и эксплуатацией технических устройств. Представлены направления развития и актуальное состояние электромагнитных методов неразрушающего контроля материалов и готовых изделий.

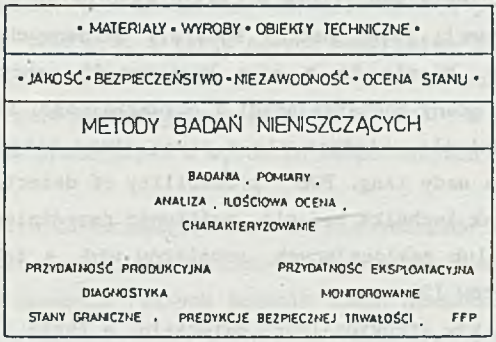
1. OBSZAR I ZADANIA BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

Obszary, w których obecność swoją zaznaczyły badania nieniszczące, jako wyodrębniająca się dyscyplina technologii w ostatnim czterdziestoleciu, stojące przed nimi cele, wyłaniające się zadania i powiązania z innymi obszarami nauki i techniki, ilustruje rysunek 1a. Wymagania w zakresie bezpieczeństwa, niezawodności pracy i ekonomicznej eksploatacji maszyn, urządzeń, konstrukcji, instalacji i budowli stanowią podstawową motywację i główną siłę napędową dla badań nieniszczących, w których wykorzystuje się oddziaływanie pól fizycznych lub ośrodków, ze strukturą materiałów, celem zbierania informacji pomocnych przy ustalaniu technologicznej i technicznej przydatności materiału do spełniania określonych funkcji, śledzenia stopnia zużywania się urządzeń i konstrukcji oraz dokonywania prognoz dotyczących bezpiecznej eksploatacji.

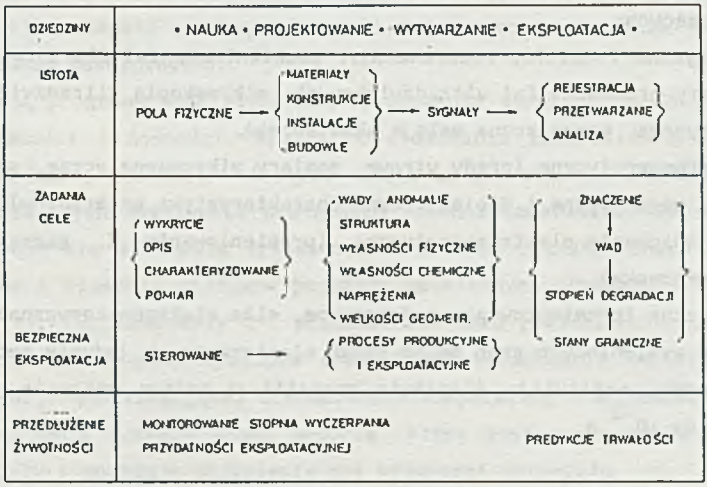
Dla prawidłowego rozwoju badań nieniszczących istotną rolę odgrywają powiązania między nauką, projektowaniem, wytwarzaniem i eksploatacją (rys. 1b). Wiedza o potrzebie i możliwościach badań nieniszczących powinna być już wykorzystywana w sferze projektowania, aby nowe rozwiązania konstrukcyjne zapewniały dobrą podatność kontrolną, czyli żeby stwarzały łatwy stosunkowo dostęp do miejsc krytycznych, które mają podlegać w czasie eksploatacji okresowemu dozorowaniu.

Podstawą do zdobywania informacji jest oddziaływanie pól fizycznych ze strukturą materiału. W wyniku tego oddziaływania powstają sygnały, które wymagają odpowiedniej obróbki, aby wydobyć zawarte w nich informacje o poszukiwanych cechach materiałów. Zadania badań nieniszczących sprowadzają się do wykrycia wad lub anomalii struktury albo też odchyłek od wymiarów nominalnych. Aby móc dokonać oceny znaczenia wykrytych anomalii, naruszających spoistość materiału, konieczne jest ich zwymiarowanie. Otwiera to drogę do przeprowadzenia klasyfikacji, wymaganej często w zastosowaniach praktycznych, ustalenia warunków technicznych odbioru wyrobu, a także do przeprowadzenia analizy dostosowania do przeznaczenia (ang. fitness- for-purpose). Przypadki takie występują niejednokrotnie w czasie eksploatacji, gdy chodzi o podjęcie decyzji, czy stwierdzone uszkodzenie lub wykryta wada, niedostrzeżona w czasie wytwarzania, stanowi istotne zagrożenia dla bezpiecznej eksploatacji. Chodzi więc tutaj o ocenę znaczenia wad lub anomalii. Aby tego dokonać, potrzebna jest analiza uwzględniająca warunki pracy, stan naprężeń, oddziaływanie środowiska i scharakteryzowanie wady, czyli podanie jej lokalizacji i rozmiarów. Wykorzystać tutaj należy również nagromadzone doświadczenia w pracy urządzeń o podobnym lub takim samym przeznaczeniu [1].

a)



b)



Rys. 1. Metody badań nieniszczących

a) obszar i funkcje, b) powiązania, cele i zadania

Fig. 1. Methods of nondestructive tests

a) area and functions, b) links, aims and tasks

Wiele konstrukcji, szczególnie samoloty i pojazdy kosmiczne, projektowane są według filozofii konstrukcji tolerowanego uszkodzenia [2]. Dopuszcza się więc możliwość istnienia wad, które w czasie eksploatacji mogą się rozwijać. Istotną rolę odgrywają tutaj metody kontroli okresowych lub monitorowania stanu technicznego. Niesie to z sobą konieczność precyzyjnego określania warunków kontroli, oceny powtarzalności i odtwarzalności badań.

Oddzielne zagadnienia, wiążące się z oceną stanu materiału, to prawdopodobieństwo wykrycia wady (ang. POD - probability of detection). Zależy ono od wielu czynników, jak technika badania, możliwość rozróżniania wskazań wady od wskazań pozornych lub zakłócających, rozmiarów wad, a także od stopnia wyszkolenia kontrolerów [3].

Rozmiary składników strukturalnych materiału, a także i wad rozciągają się w obszarze od 10^{-10} m do 10^{-2} m i obejmują dyslokacje, pustki, teksturę, anizotropię, rozmiary ziaren, wydzielenia, wtrącenia, pory, pęknięcia, rozwarstwienia [4]. Do przeprowadzenia kontroli i śledzenia rozwoju tych niedoskonałości lub wad spoistości materiału stosuje się głównie metody badań nieniszczących:

- akustyczne (odbicie, rozproszenie, pochłanianie fal ultradźwiękowych, popomiary prędkości fal ultradźwiękowych, mikroskopia ultradźwiękowa, emisja akustyczna, magnetyczna emisja akustyczna),
- elektromagnetyczne (prądy wirowe, pomiary mikromagnetyczne, szumy Barkhausena, magnetyczne i dielektryczne charakterystyki materiałów),
- promieniowanie elektromagnetyczne (promieniowanie X, gamma, tomografia rentgenowska),
- termiczne (promieniowanie podczerwone, siła elektromotoryczna).

Wśród wymienionych grup metod badań nieniszczących jedynie metody elektromagnetyczne umożliwiają śledzenie anomalii w pełnym zakresie rozmiarów od 10^{-10} m do 10^{-2} m.

2. MOTYWACJE ROZWOJU

Potrzeby rozwoju i doskonalenia technik badań nieniszczących wynikają z potrzeb gospodarczych, w szczególności ze swoistego wyzwania materiałowego, które wypływa z realizacji dużych programów badawczych. Wymienić tutaj można:

- Program NASP [5] (National Aero-Space Plane Program), który zakłada opracowanie, w połowie lat 1990, pojazdów przeznaczonych do lotów z dużą prędkością w atmosferze i poza nią,

- Program BRITE-EURAM [6] (Basic Research in Industrial Technologies-European Research in Advanced Materials), przyjęty do realizacji przez Wspólnotę Europejską, poświęcony zastosowaniu nowych przemysłowych technologii (BRITE od 1985 r.), a także nowych materiałów (EURAM od 1989 r.),
- Program badawczy BMEF [7] (finansowany od 1985 r. przez RFN), który obejmuje prace w zakresie następujących grup materiałów: ▪ ceramiki, ▪ proszków, ▪ materiałów pracujących w wysokich temperaturach, ▪ nowych polimerów, ▪ kompozytów.

W każdym z tych kierunków uwzględnione są nieniszczące metody badania lub charakteryzowania materiałów. Prawidłowa i niezawodna praca tych nowych materiałów wymaga zastosowania różnych technik badań nieniszczących, przy czym muszą one zapewniać przeprowadzenie kontroli spoistości materiału na znacznie wyższym niż obecnie poziomie wykrywalności niedoskonałości materiałowych. Metody te powinny stwarzać również możliwość przewidywania (predykcji) trwałości, oceny bezpiecznego okresu eksploatacji, co wiąże się z koniecznością przeprowadzania badań w czasie wytwarzania, w czasie eksploatacji i po jej zakończeniu, kiedy zapaść ma decyzja o możliwości ponownego użycia (np. elementy wahadłowców kosmicznych).

Z realizacją programu NASP wiąże się opracowanie struktur cienkościennych o dużej sztywności i nośności. Wymaga to stosowania materiałów o wysokiej wytrzymałości, małej gęstości, zdolnych zachować swe własności w temperaturach przekraczających możliwości dostępnych obecnie materiałów. Te nowe materiały upatruje się w stopach tytanowo-aluminiowych przeznaczonych na konstrukcje nośne i elementy silników pojazdów kosmicznych, kompozyty z osnową metalową Ti,Al, Cu, kompozyty C-C przeznaczone jako powłoki ochronne przed wysoką temperaturą i oddziaływaniem środowiska. Niezależnie od stworzenia bariery cieplnej, umożliwiającej zredukowanie temperatury o kilkaset stopni, chodzi o stworzenie ochrony przed wodorem, który szybko dyfunduje w większość materiałów i powoduje pojawienie się kruchości materiału.

Programy BRITE-EURAM powstały przy założeniu, że obecnie zanikają różnice między przedsiębiorstwami stosującymi tradycyjne i zaawansowane technologie. W przyszłości podział będzie przebiegał między tymi, którzy stosują i tymi, którzy nie stosują zaawansowanych technologii. W badaniach nieniszczących, ujętych kierunkowo w tych programach z przeznaczeniem 11% obecnych wydatków, uwaga skupia się na ▪ wykrywaniu wad i niejednorodności o wymiarach mikrometrów, ▪ układach wieloczujnikowych do kontroli procesów produkcyjnych o dużej wydajności, ▪ technikach inspekcji w szkodliwych warunkach przemysłowych, ▪ metodach kontroli przeprowadzanych w czasie procesu wytwarzania

celem zastąpienia niszczących metod charakteryzowania wyrobu, ▪ nowych metodach kontroli i sterowania jakością elementów obrabianych powierzchniowo, ▪ metodach umożliwiających obniżenie poziomu wad przez monitorowanie w czasie procesu wytwarzania, ▪ kontroli drobnych cząstek o rozmiarach w granicach 1-10 μm, stosowanych przy produkcji elementów spiekanych.

Wśród technik wytwarzania zauważa się zainteresowanie powłokami napylanymi plazmowo. Istnieje tutaj konieczność sterowania procesem i monitorowania w czasie rzeczywistym, zwłaszcza w zakresie pomiaru grubości, gęstości i poziomu wadliwości. Predystynowane są do tych zastosowań metody elektromagnetyczne do kontroli temperatury podłoża, gęstości wad, występowania pęknięć lub braku przyczepności.

O ile charakteryzowanie stanu materiałów jednorodnych osiągnęło poziom dużej dojrzałości, zarówno z punktu widzenia techniki kontroli, zasad interpretacji i oceny znaczenia wad materiałowych, to w przypadku materiałów złożonych, to znaczy zbrojonych, wielowarstwowych kompozytów i powłok ochronnych, otwiera się kolejne wyzwanie. Wiąże się to z oceną stanu powierzchni granicznych między poszczególnymi elementami strukturalnymi.

3. TECHNIKI POMIAROWE. TENDENCJE ROZWOJOWE

W technikach pomiarowych wyróżnić należy metody pomiaru i interpretacji wyników, układy pomiarowe i czujniki.

Oddziaływanie prądów wirowych z pęknięciami wychodzącymi na powierzchnię powoduje małe zmiany impedancji cewki. Jeżeli $d/\delta \geq 2$, gdzie d jest wysokością szczeliny, a δ głębokością penetracji, zwaną również grubością naskórka, to uzyskuje się dokładność ± 0,1 mm [8]. Zauważono jednak przy pęknięciach zmęczeniowych, że wyniki pomiarów głębokości pęknięć są zaniżone o 30 do 40%. Przyczynę tego stanu upatruje się w zamykaniu szczeliny zmęczeniowej, co powoduje powstawanie kontaktów elektrycznych na stykających się powierzchniach pęknięcia, przez które mogą przepływać prądy wirowe. W celu rozróżniania stanów, w których mamy do czynienia z zamykaniem szczeliny zmęczeniowej, powodującym zmiany impedancji, opracowano model dwuwymiarowy i wykazano, że zmiana fazy jest wskaźnikiem zamykania się szczeliny [9].

Prądy małej częstotliwości, rzędu kilkudziesięciu Hz, znalazły już w latach sześćdziesiątych zastosowanie do badania rurociągów. W przeciwieństwie do klasycznej teorii prądów wirowych, według której na skutek zjawiska naskórkowości powinien wystąpić, przy wzroście odległości między cewką na-

dawczą i odbiorczą, monotoniczny zanik amplitudy i wzrost fazy, obserwuje się ze wzrostem odległości między cewką nadawczą i odbiorczą szybkie zmniejszanie się amplitudy, a następnie wolne; przejście to występuje w odległości równej 1,8 średnicy cewki [10-15]. Przy tej odległości gwałtownej zmianie ulega również faza, stąd pochodzi nazwa strefy pola bliskiego i strefy pola odległego (ang. RFEC - remote field eddy current). Zaletą tej metody, w której wykorzystuje się pole odległe lub przez analogię do pola ultradźwiękowego, pole dalekie, jest między innymi jednakowa czułość przy wykrywaniu wad w pobliżu zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni rury, liniowa zależność między kątem fazowym i grubością ścianki rury, mały wpływ na oddalenie cewki (ang. lift-off) oraz przechylenie (ang. tilt-off). Metoda dalekiego pola prądów wirowych nie nadaje się do zastosowania przy badaniu rur krótkich, bowiem odległość między cewką nadawczą i odbiorczą wynosi od 2-3 średnic rury lub średnicy cewki umieszczonej wewnątrz rury. Próby stworzenia podstaw teoretycznych, wyjaśniających zaobserwowane charakterystyki, podjęto w ostatnich latach, budując, przy zastosowaniu metody elementu skończonego, kontury jednakowej fazy i strumienia.

Przy pomiarach odchylenia rury od przebiegu osi wykorzystuje się zjawisko uniesienia (ang. lift-off) i zjawisko krawędziowe [16]. Znaczenie tego rodzaju pomiarów polega na tym, że odchylenia powodują powstawanie naprężeń, a te z kolei są przyczyną przyśpieszonej korozji i pękania.

W ostatnich latach daje się zauważyć wzrost zainteresowania rozwijaniem technik zobrazowania wad [17]. Chodzi tutaj o dwuwymiarowe obrazy, których elementami są składowe, urojona i rzeczywista, impedancja czujników prądów wirowych.

Główne czynniki ograniczające wykrywalność wad cewek pojedynczych prądów wirowych wiążą się z zakłóceniami spowodowanymi przez wpływ uniesienia (ang. lift-off) i przechylenia (ang. tilt-off). Badania przeprowadzone w Amerykańskich Siłach Powietrznych [18] na 30 czujnikach ekranowanych i nieekranowanych wykazały, że przy przyjęciu dopuszczalnego progu, równego 0,5, określonego stosunkiem amplitudy sygnału wady przy uniesieniu równym 0,15 mm do amplitudy sygnału bez uniesienia, warunek ten spełniło 97% czujników nieekranowanych, a tylko dziesięć procent czujników ekranowanych. Przy podobnie zdefiniowanym progu dla wpływu przechylenia, warunek taki spełniło 77% czujników ekranowanych i 73% czyjników nieekranowanych. Spostrzeżenie to podkreśla fakt, że zmiany czułości związane są z konstrukcją czujników, zatem konieczne jest opracowanie zasad charakteryzowania czujników prądów wirowych i przewidywania czułości. Pomocne mogą być tutaj komputerowe sposoby zobra-

zowania i procedury zbierania i formatowania danych pomiarowych oraz standardowe wzorce do charakteryzowania czujników [19-21].

Oddzielną grupę stanowią czujniki pojemnościowe [22-25]. Są one przeznaczone w pierwszym rzędzie do badania materiałów izolacyjnych; umożliwiają wykrywanie wad powierzchniowych i podpowierzchniowych, porowatości, grubości osłon termicznych, monitorowanie starzenia kompozytów, a także służą w robotach do pomiarów odległości. Umożliwiają one również pomiary uskoków powierzchni o wysokości 25 μm, wykrywanie wad w dielektrykach na głębokości do 4 mm i pęknięcia w szkle o szerokości 4 μm [25]. Podejmowane są próby budowania szeregowych czujników pojemnościowych [19] składających się z cienkich elektrod. Stwarza to możliwości rozróżniania czynników geometrycznych (odległość) od sygnałów związanych z własnościami dielektrycznymi [24].

4. OBRÓBKA SYGNAŁÓW, MODELOWANIE, ZAGADNIENIA PROSTE I ODWROTNE

Obróbka sygnałów prądów wirowych zmierza do uzyskania poprawy w charakteryzowaniu wykrytych wad. Na przykład przy stosowaniu jednej częstotliwości w badaniach rur wymienników ciepła otrzymuje się sygnał złożony z oddziaływania kilku odmiennych czynników, przewodności elektrycznej, przenikalności magnetycznej, zmian grugości ścianki, wpływu wklęśnięć, podpór itp. Zadanie obróbki sygnału polega na ekstrakcji pożądanej informacji ze złożonego sygnału powstającego przy występowaniu wielu nieciągłości lub czynników generujących sygnały. Przy obróbce sygnałów, trajektorii, zamkniętych pętli stosuje się różne transformacje (np. rozkłady Fouriera) zmierzające do uzyskania wektora cech, a przez zastosowanie konwencjonalnych metod rozpoznawania obrazów dokonywanie klasyfikacji wskazań o zbliżonych cechach.

Numeryczne modelowanie służy do symulowania oddziaływania pola elektromagnetycznego z wadą przy różnych założonych warunkach brzegowych [26-29]. Zastosowanie znajdują metoda elementu skończonego, metoda elementów brzegowych (ang. BEM) lub odwrotna transformacja Laplace'a. Uzyskuje się dzięki temu, na przykład, profile przewodności pomocne przy charakteryzowaniu wtrąceń w półprzestrzeni przewodzącej, rozkład pola elektrycznego wokół szczeliny powierzchniowej przy różnej grubości "naskórka" (głębokości wnikania),powierzchnię pola magnetycznego i jego perturbację spowodowane występowaniem wad.

Wymienione powyżej sposoby postępowania ilustrują tak zwany prosty problem modelowania (ang. forward problem) [30]. Polega on na przewidywaniu sygnału

przetwornika powstającego w wyniku oddziaływania prądów wirowych z dowolnie ukształtowaną wadą. Zagadnieniem odwrotnym (ang. inverse problem) jest przewidywanie lokalizacji, kształtu i rozmiarów wady na podstawie sygnału uzyskanego na przetworniku, czyli klasyfikacja wady. Zjawiska oddziaływania energii pola fizycznego z wadą opisuje się w badaniach nieniszczących za pomocą trzech typów równań różniczkowych cząstkowych. Są to równania eliptyczne $d^2y/dx^2 = 0$, paraboliczne $d^2A/dx^2 = a\, dA/dt$ i hiperboliczne $d^2u/dx^2 = k\, d^2u/dt^2$. Mają one zastosowanie przy rozpatrywaniu problemów prostych, czyli modelowaniu, i problemów odwrotnych, których zadaniem jest odtworzenie albo klasyfikacja wady. Równania eliptyczne służą do opisu spadku potencjału elektrycznego wykorzystywanego przy pomiarach głębokości pęknięć lub wycieku strumienia magnetycznego. Prądy wirowe są opisane przez równanie paraboliczne, a równania hiperboliczne służą do opisu fal ultradźwiękowych i mikrofal.

Rozwiązywanie problemów prostych i odwrotnych w badaniach nieniszczących wymaga zastosowania komputerów, przy czym trudności niepomiernie wzrastają w przypadku rozwiązywania zagadnień trójwymiarowych opisanych równaniami parabolicznymi i hiperbolicznymi ze względu na konieczność dyskretyzacji zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Stopień trudności przy rozwiązywaniu zagadnień prostych wzrasta, gdy przechodzi się od równań eliptycznych do hiperbolicznych. Przeciwnie kształtuje się stopień trudności w przypadku zagadnień odwrotnych.

Przykładem zagadnienia odwrotnego dla prądów wirowych jest charakteryzowanie wad w dziedzinie czasu. Dotychczas większość problemów rozwiązywana jest w dziedzinie częstotliwości [31]. Zalety prezentacji w dziedzinie czasu uwidaczniają się przy opisie oddziaływania impulsowych prądów wirowych, opisie pęknięć zamkniętych w półprzestrzeni, perturbacji impedancji wywołanej inkluzją o przewodności nieznacznie różniącej się od przewodności ośrodka.

5. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

Poniżej przedstawione zostaną niektóre, wybrane zastosowania metody prądów wirowych i metod magnetycznych. Pomiaru grubości plateru i małych grubościach na aluminium przy zbliżonych przewodnościach dokonano za pomocą prądów wirowych o częstotliwości 30 kHz i 100 kHz, wprowadzając odpowiednią korekcję na przewodność i wpływ uniesienia [32].

Za pomocą magnetometrów dokonano pomiaru rozkładu prądu w rurociągach gazowych chronionych katodowo [33]. Zaletą jest to, że nie wprowadza się z ze-

wnątrz sygnałów zakłócających i nie jest wymagany kontakt z rurociągiem. Stwierdzono, że zastosowanie cewki poziomej zamiast cewki pionowej przy badaniu zbiorników ciśnieniowych ze stali austenitycznej daje lepszą wykrywalność wad [34].

Wyłaniają się możliwości badania kompozytów wzmocnionych włóknami węgla nawet przy grubościach dochodzących do 250 mm. Przy znacznie większej oporności elektrycznej kompozytów z włóknami węgla zasięg penetracji jest duży w porównaniu z metalami [35]. Jeżeli przy częstotliwości 10 kHz w stali nierdzewnej wynosi on około 4 mm, to przy kompozytach z włóknami węgla dochodzi do 50 mm. Przy zastosowaniu cewek widełkowych można badać elementy o grubościach większych niż zasięg penetracji. Składowe impedancji dla tych materiałów przyjmują również wartości ujemne.

W celu zbadania wpływu długości, głębokości i szerokości wad na odpowiedź prądów wirowych wykonano specjalne wzorce, za pomocą których ustalono zależność amplitudy sygnału od zmieniających się rozmiarów wad [36].

Spośród parametrów mierzonych w czasie przeprowadzania procesu wymienić można pomiar zmian oporności w stopach Al-Ti [37], pomiar naprężeń własnych wokół cylindrycznej spoiny wykonanej na płaskim elemencie [38], pomiary przeprowadzone przy prasowaniu na gorąco proszków metalu i ceramiki [39] oraz zmiany oporności i temperatury przy wytłaczaniu prętów aluminiowych [40].

Odnotować też należy badania cienkich rurek ze stali nierdzewnej, o średnicy 3,66 mm, grubości ścianki 0,127 mm, przy czułości ustalonej na poziomie 0,015 mm (12% grubości ścianki) w paśmie 20 MHz [41].

Oddzielną gałąź stanowią zastosowania metod magnetycznych, których poświęca się ostatnio dość dużo uwagi. Wymienić tutaj można podejście ujęte symbolem 3MA (ang. Micromagnetic Microstructure Multiparameter Analysis), w którym wykorzystuje się metody magnetyczne (szumy Barkhausena, magnetostrykcję, przenikalność) i prądy wirowe do wieloparametrowej analizy struktury materiału [42]. Opracowane na te potrzeby cewki z rdzeniem ferrytowym są pięciokrotnie czulsze na zmiany impedancji niż cewki powietrzne.

Za pomocą mostka magnetycznego prądu zmiennego dokonano pomiaru naprężeń [43], co wskazuje na techniczne możliwości wynaczania naprężeń własnych w metalach. Zastosowanie szumów Barkhausena daje możliwość oceny przeciążenia przy ściskaniu powodującym odkształcenia plastyczne.

Próbą podejścia do utraty zdolności materiału do przenoszenia obciążeń w wyniku zmęczenia są pomiary magnetyczne, zmierzające do stwierdzenia zmian w koercji, remanencji magnetycznej, przenikalności początkowej, podatności magnetycznej [44].

Dość luźno związane z metodami elektromagnetycznymi są badania przeprowadzone metodami akustycznymi (elektromagnetyczne przetworniki magnetyczne, EMAT i magnetyczna emisja, ang. MAE). Przetworniki EMAT [45] zastosowano do wytwarzania fal Rayleigha małej częstotliwości (500 kHz, częstotliwość powtarzania 60 Hz) celem wykrycia pęknięć w obręczach kół kolejowych bądź też w litych kołach kolejowych. Temu samemu celowi służą próby zastosowania magnetoakustycznej emisji. Pęknięcia w kołach powstają w czasie hamowania. W USA rocznie wymienia się 235 000 kół, aby zapobiec awariom [46].

Próby pomiaru głębokości warstw utwardzonych wykazały, że możliwe jest to do 4 mm przy zastosowaniu szumów Barkhausena i do 2 mm przy pomiarach przenikalności przyrostowej [47].

6. NIEZAWODNOŚĆ KONTROLI

Prawdopodobieństwo wykrycia wad (ang. POD -probability of detection) [46] oraz prawdopodobieństwo fałszywego alarmu (ang. PFA - probability of false alarm), a także prawdopodobieństwo rozpoznania wady (ang. POR - probability of recognition) nabierają dużego znaczenia w świetle podejść wiążących się z niezawodnością i bezpieczeństwem pracy [49]. Zagadnieniu temu poświęcono dużo uwagi w dwóch programach przeznaczonych dla lotnictwa, ASIP (Structural Integrity Program) i ENSIP (Engine Structural Integrity Program [50]). Wiąże się to z okresowo przeprowadzanymi badaniami kontrolnymi, które powinny być dokonywane przy ściśle określonym prawdopodobieństwie wykrycia wady. Obok konieczności gromadzenia i przetwarzania dużego zbioru informacji i zastosowania metod statystycznych, na przykład analizy wariancji i statystyki chi-kwadrat, istotną rolę odgrywa tutaj czynnik ludzi [52]. Wpływ tego ostatniego czynnika szczególnie przejawia się w interpretacji wyników badań międzykrystalicznych pęknięć spowodowanych naprężeniami w środowisku korozyjnym, występujących w elementach konstrukcyjnych elektrowni jądrowych.

7. Wnioski

Na tle ogólnego zapotrzebowania, jakie rysuje się przed badaniami nieniszczącymi od strony poznawczej i praktycznej, nakreślono tendencje przejawiające się w realizacji nowych zadań, uwarunkowanych postępem technicznym i gospodarczym. Łańcuch działań obejmuje wykrycie wad struktury materiału bądź

nieprawidłowego funkcjonowania urządzeń, pomiar charakterystycznych parametrów oddziaływania pól fizycznych z materiałem bądź obiektem, rejestrację, przetwarzania i analizę odpowiedzi oraz znaczenie wykrytych anomalii. Stąd wynika możliwość opracowywania prognoz dotyczących eksploatacyjnej przydatności wyrobów na podstawie analizy ryzyka zniszczenia urządzenia oraz wyczerpywania zdolności do spełniania przewidzianych funkcji.

Istotną rolę w rozwiązywaniu powyższych zadań odgrywa komputerowe wspomaganie, które rozciąga się, obok analizy, również na modelowanie przewidywanej odpowiedzi i podniesienie precyzji i niezawodności kontroli, obejmując również sterowanie eksperymentem, kontrolą, pomiarem i śledzenie przebiegu procesu.

Mimo iż metody elektromagnetyczne nie stanowią przeważającej grupy w całokształcie metod nieniszczących, znaczenie ich jest szczególne, bowiem umożliwiają one śledzenie anomalii w pełnym zakresie, w którym przejawiają się one w rzeczywistości, poczynając od defektów struktury krystalicznej do dużych, makroskopowych wad pochodzenia technologicznego i eksploatacyjnego. Podane, wybrane przykłady ilustrują powyższe wnioski.

LITERATURA

[1] Pawłowski Z.: Ocena znaczenia wad i klasy jakości oparte na wynikach badań nieniszczących. W: Materiały 17 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Politechnika Częstochowska, SIMP, Kozubnik 1988, s. 53-60.

[2] Pawłowski Z.: Odkształcenie i pękanie materiałów, Poradnik IIB, ODK SIMP, Warszawa 1986.

[3] Pawłowski Z.: Zagadnienia powtarzalności w ultradźwiękowych badaniach spoin. W: Materiały 18 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, SIMP, Szczyrk 1989, s. 175-180.

[4] Hoeller P.: Recent developments and trends in nondestructive characterization of materials, in International Conference on Monitoring, Surveillance and Predictive Maintenance of Plants and Structures, Taormina, Italy, 15-18 Oct. 1989.

[5] Ronald T.M.: Materials challenges for the national aero-space plane, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 8A, pp. 1-13.

[6] Van der Eijk W.: Presentation of the next BRITE-EURAM-Programme, 1989-1992, Proc. Nondestructive Characterization of Materials, Proc. 3rd International Symposium Saarbruecken, FRG, 3-6 Oct. 1988, pp. 3-7.

[7] Faul W.: Materials research programme of the Federal Ministry for Research and Technology (BMFT), ibid., pp. 8-13.

[8] Moulder J.C., Nakagawa N., Shull P.J.: Progress in uniform field eddy current methods, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 7A, Plenum Press, New York 1988, pp. 147-155.

[9] Nakagawa N., Kogan V.G., Bozzolo G.: Effect of crack closure on eddy current signals, ibid., vol. 7A, pp. 173-179.

[10] Udpa L., Sun Y.S., Lord W., Shin Y.K.: Mesh and boundary considerations in the numerical modeling of large 3-D electromagnetic geometries, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 793-800.

[11] Palanisamy R.: Remote-field eddy current testing: A review, ibid., Vol. 7A, 1988, pp. 157-164.

[12] Lord W., Sun Y.S., Udpa S.S., Nath S.: Physics of the remote field eddy current effect, ibid., Vol. 7A, 1988, pp. 165-172.

[13] Nath S., Lord W., Sun Y.S.: Theoretical and experimental studies of the remote field eddy current effect, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 267-274.

[14] Udpa S.S., Ou-Yang T.H., Lord W.: Signal processing for remote field eddy current inspection technique, ibid., Vol. 7A, 1988, pp. 831-838.

[15] Ida N.: The remote field effect and its interpretation, ibid., Vol. 8A, 1989, pp, 275-281.

[16] Chern E.J.: Applications of eddy current principles for measurement of tube centerline deflection, ibid. Vol. 7B, 1988, pp. 1709-1714.

[17] Nath S., Udpa S.S.: New signal processing scheme for the analysis of electromagnetic images, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 769-776.

[18] Burkhardt G.L.: Eddy current probe performance characterization, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 967-974.

[19] Hedengren K.H., McCary R.O., Young J.D.: Eddy current probe evaluation: experimental measurements and system interaction, ibid. Vol. 8A, 1989, pp. 975-983.

[20] Capobiance T.E., Vecchia D.F.: Coil parameter influence on eddy current probe sensitivity, ibid., Vol. 7A, 1988, pp.487-492.

[21] Capobianco T.E., Ciciora S.J.: Standard flaws for eddy current probe characterization, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 985-989.

[22] Shull P.J., Clark A.V., Heyliger P.R.: Liftoff: Capacitive array sensors, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 1013-1021.

[23] Heyliger P.R., Moulder J.C., Nakagawa N.: Numerical simulation of the flaw detection with a capacitive array sensor using finite and infinite elements, ibid., Vol. 8A, 1989, pp. 1023-1030.

[24] Heyliger P.R., Moulder J.C., Shull P.J., Gimple M., Auld B.A.: Numerical modelling of capacitive array sensors using the finite element method, ibid., Vol. 7A, pp. 501-508.

[25] Shull P.J., Moulder J.C., Heylinger P.R., Gimple M., Auld B.A.: Application of capacitive arrays sensors to nondestructive evaluation, ibid., Vol. 7A, pp. 517-523.

[26] Stolte J., Udpa L., Lord W.: Multifrequency eddy current testing of steam generator tubes using optimal affine transformation, ibid., Vol. 7A, pp. 821-830.

[27] Lewis A.M., Michael D.H., Lugg M.C., Collins R.: Thin-skin electromagnetic fields around surface-breaking cracks in metals, ibid., Vol. 8A, pp. 237-244.

[28] Nakazawa N.: Eddy-current detection methods for surface-breaking tight cracks, ibid., Vol. 8A, pp. 245-250.

[29] Dodd C.V., Pate J.R., Deeds W.E.: Eddy-current inversion of flaw data from flat-bottomed holes, ibid., Vol. 8A, pp. 305-312.

[30] Lord W.: Partial differential equations and the nde inverse problem, ibid., Vol. 7A, pp. 425-430.

[31] Nair S.M., Rose J.H., Kogan V.G.: Eddy current flaw characterisation in the time domain. ibid., Vol. 7A, pp. 461-469.

[32] Johnson W.V., Thangevelu M., Haugh M.J.: Multifrequency eddy current clad thickess measurements of thin aluminium alloy combinations having similar conductivities, ibid., Vol. 8B, pp. 1353-1380.

[33] Murphy J.C., Srivivasan R., Lillard R.S.: Magnetometer-based measurements of stray current distribution on cathodically protected gas transmission pipeline, ibid., Vol. 8B, pp. 2149-2156.

[34] Clark R., Bond L.J., French P.: The use of horizontal axis coils for the eddy current inspection of fast breder reactor primery vessels, ibid., Vol. 8A, pp. 283-290.

[35] Vernon S.N.:Eddy current inspection of thick carbon fiber reinforced composites, ibid., Vol. 8B, pp. 1543-1550.

[36] Mirshekar-Syahkal D., Sa deghi S.H.H.: Study of the effect of frequency in crack depth measurement by the ac field technique, ibid., Vol. 7A, pp. 181-189.

[37] Bracci D.J., Garikepati P., Jiles D.C., Buck O.: Search for nde methods to characterize thermal history and mechanical properties of Al-Li alloys, ibid., Vol. 7B, pp. 1255-1262.

[38] Burkhardt G.L., Kwun H.: Measurement of residual stresses around a circular patch weld using Barkhausen noise, ibid., Vol. 8B, pp. 2043-2050.

[39] Wadley H.N.G., Kahn A.H., Gefen Y., Mester M.: Eddy current measurement of density during hot isostatic pressing, ibid., Vol. 7B, p. 1589-1598.

[40] Kahn A.H., Mester M.L.: An eddy current sensor for the measurement of resistivity and temperture of aluminum rod during extrusion processing, ibid., Vol. 7B, pp. 1599-1605.

[41] Pickett C.A., Koerner D.W.: A pulsed eddy current method for examining thin-walled stainless steel tubing, ibid., Vol. 7B, pp. 1695-1702.

[42] Dobmann G., Becker R., Rodner C.: Quantitative eddy current variants for micromagnetic microstructure multiparameter analysis (3MA), ibid., Vol. 7B, pp. 1703-1707.

[43] Zinke O.H., Schmidt W.F.: Measurement of stress with ac magnetic bridges, ibid., Vol. 8B, pp. 2051-2059.

[44] Jiles D.C., Garikepati P., Thoelke J.B., Utrata D.: Detection of fatigue life of AISI 4140 steels from magnetic measurements, ibid., Vol. 8B, pp. 2061-2066.

[46] Schtamm R.E., Shull P.J., Clark A.V., Mitrokovi D.V.: EMATS for roll-by crack detection of railroad wheels, ibid., Vol. 8A, pp. 1083-1089.

[46] Namkung M., Utrata D.: Nondestructive residual stress measurements in railroad wheels using the low-field magnetoacoustic test method, ibid., Vol. 7B, pp. 1429-1438.

[47] Dobmann G., Kern R., Alpeter I., Theiner W.: Quantitative hardening-depth-measurements up to 4 mm by means of micromagnetic microstructure multiparameter analysis (3MA), ibid., Vol. 7B, pp. 1471-1475.

[48] Beissner R.E., Bartels K.A., Fisher J.L.: Prediction of the probability of eddy current flaw detection, ibid., Vol. 7B, pp. 1753-1760.

[49] Hovey P.W., Berens A.P.: Statistical evaluation of nde reliability in the aerospace industry, ibid., Vol. 7B, pp. 1761-1768.

[50] Howey P.W., Sproat W.H., Schattle P.: The test plan for the next air force ndi capability and reliability assessment program, ibid., Vol. 8B, pp. 2213-2220.

[51] Annis Ch., Erland K.: Measuring differences among probability of detection curves, ibid., Vol. 8B, pp. 2229-2234.

[52] Behravesh M.M., Karimi S.S., Ford M.E.: Human factors affecting the performance of inspection personnel in nuclear power plants, ibid., Vol. 8B, pp. 2235-2242.

Recenzent: Prof. dr inż. Tadeusz ZAGAJEWSKI

Wpłynęło do Redakcji w maju 1990 r.

A b s t r a c t

The paper describes the general background of non-destructive testing, its areas of application and tasks. The connection of non-destructive testing with design, production and utilization processes as well as motivations which form the basis for its progress are stressed. The position of electromagnetic methods and their capabilities of characterising the state of test material is emphasised.

The main tendencies and directions of development of electromagnetic methods manifest themselves by improvement in measuring techniques, processing of registered signals, improvement in measuring probes and systems and modelling the interaction between the electromagnetic field and the structure of the material. In the process of modelling two problems are solved with the help of a computer. The first problem is to determine the signal which is induced in the transducer (sensor) as a result of the interaction between edy currents and a fault of any shape. The second problem, which is reverse to the first one, is to determine the location, shape and size of the fault, i.e. to classify the fault.

Apart from aiming at making the interpretation of measurement results more precise by taking into account and elimination of interfering factors displaying techniques have been developed, which lead to obtaining two-dimensional images.

A series of chosen examples illustrates the practical side of application of electromagnetic testing techniques. The significance of test reliability, which is a problem common to all methods of non-destructive testing, is also stressed, since reliability and precision of measurement results are strictly connected with serviceability of systems and safety of service and, therefore, with economical and rational operation.