

Badania Nieniszczące Metodami Elektromagnetycznymi

Streszczenie. Tematem artykułu jest krótki zarys historyczny rozwoju badań nieniszczących z uwzględnieniem prac naukowych prowadzonych w tej dziedzinie w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Summary: The paper describes briefly the historical development of the non-destructive testing. It includes the scientific work conducted in this area at the Chair of Electroengineering and Informatics of Westpomeranian Technological University. **Nondestructive testing by electromagnetic methods**

Keywords: nondestructive testing, eddy current testing, potential drop, terahertz testing.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, badania wiroprowodowe, metoda potencjałowa, metoda terahercowa.

Wstęp

Celem badań nieniszczących jest określenie stanu i właściwości materiałów użytych do budowy urządzeń oraz ich części bez naruszenia ciągłości oraz bez dokonania jakiegokolwiek innej zmiany w strukturze. Obiekt po badaniu musi pozostać taki sam jak przed badaniem. Badania nieniszczące są prowadzone w oparciu o zjawiska fizyczne zachodzące wewnątrz niego lub na jego powierzchni, ale tylko takie, które nie będą powodowały żadnych trwałych zmian. Przykładem może być metoda wizualna czyli w najprostszym przypadku badanie obiektu polegające na oglądaniu. Oglądając obiekt zachowujemy go w takim stanie w jakim się znajdował. Nawet w tak wydawałoby się prostym przypadku mogą w pewnych warunkach pojawić się wątpliwości. Jest oczywiste, że nie ma żadnej zewnętrznej ingerencji w obiekt, jeżeli oglądamy go w naturalnym oświetleniu. Jednak zastosowanie sztucznego oświetlenia może prowadzić do uszkodzenia szczególnie delikatnych przedmiotów badań (np. obrazy olejne).

Prześwietlanie lub podświetlanie obiektu jest przejawem ingerencji zewnętrznej. Badając obiekt możemy poddawać go wymuszeniom elektromagnetycznym, mechanicznym, termicznym i innym. Wszystkie zabiegi polegają na pozyskaniu odpowiedzi obiektu na określone wymuszenie i jej interpretacji. Żadne z wymienionych wymuszeń nie może zmienić stanu badanego obiektu. Odpowiedzi obiektu obserwujemy naszymi zmysłami, a w większości przypadków odpowiednimi czujnikami. Wprowadzenie do badań nieniszczących techniki cyfrowej umożliwiło zapis odpowiedzi w postaci cyfrowej. Sygnały te mogą być zapisane w zbliżonych do siebie formatach (np. B-skan czy C-skan) niezależnie od zastosowanej metody. Uprościło to i zunifikowało prezentację wyników, a także pozwoliło na ich dalsze przetwarzanie. Między innymi, z tego powodu szerzej można wykorzystywać sztuczną inteligencję w badaniach nieniszczących.

Analizując ogólny przypadek, w każdym procesie badania można wydzielić pięć etapów:

1. akwizycję sygnałów,
2. obróbkę zarejestrowanych sygnałów,

3. rozpoznanie sygnałów,
4. klasyfikację sygnałów,
5. podjęcie decyzji.

Na każdym z wymienionych wyżej etapów można zaobserwować dynamiczny rozwój wykorzystywanych w nich narzędzi i algorytmów. Wprowadzane są nowe technologie badań, na przykład badania terahercowe czy mikrofalowe. Ulepszane są też algorytmy obróbki i klasyfikacji sygnałów. Podejmowanie decyzji coraz częściej odbywa się w oparciu o metody sztucznej inteligencji. Wprowadzane są nowe metody klasyfikacji sygnałów np. w oparciu o teorię zbiorów przybliżonych.

Profesor Don Thomson z Iowa State University w referacie "Evolution of Qnde's Core Interdisciplinary Science And Engineering Base" [1] wygłoszonym na konferencji naukowej Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation w 2009 r. przedstawił krótką historię badań nieniszczących w USA. Zdaniem prof. Dona Thomsona badania nieniszczące w USA rozwinęły się głównie w czasie Drugiej Wojny Światowej. Chodziło w tym czasie o zapewnienie możliwie najwyższej jakości i niezawodności produkcji wojennej. Ze względu na duży wojenny pośpiech nie bardzo dbano o podbudowę teoretyczną tych badań. Ich istotą była praktyka. Pierwszą organizacją zajmującą się badaniami nieniszczącymi była American Industrial Radiation and X-ray Society. Rozwój badań nieniszczących był wspierany przez Departament Obrony, NASA (Narodową Agencję Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej), Komisję Energii Atomowej i Departament Energii. Dla potrzeb NDT wyprodukowano w czasie Drugiej Wojny Światowej szereg urządzeń i rozwinięto szeroko zakrojone programy badawcze. Te działania umożliwiły głębsze poznanie procesów zachodzących w trakcie badań nieniszczących oraz ich związek z właściwościami badanych materiałów. W chwili obecnej najbardziej intensywny rozwój systemów do badań nieniszczących wynika z zastosowania techniki cyfrowej. Innym kierunkiem rozwoju jest wprowadzenie techniki ciągłego monitoringu badanych obiektów przy wykorzystaniu sieci czujników preinstalowanych w trakcie

produkcji. Obecnie wiele obiektów przemysłowych (głównie konstrukcji budowlanych), ale też i ludzi poddanych jest ciągłemu monitoringowi (Structural Health Monitoring). Ciągły monitoring urządzeń nie budzi żadnych zastrzeżeń ale monitoring ludzi w wielu przypadkach może stwarzać zagrożenia. Taka była również opinia prof. Donalda Thomsona wyrażona w wyżej wymienionym wystąpieniu. W artykule wykorzystano wprost wyniki wcześniejszych prac autorów artykułu wykonanych samodzielnie lub w zespołach.

2. Prace nad rozwojem badań nieniszczących w KETiI

Prace naukowe związane z badaniami nieniszczącymi rozpoczęły się w KETiI w 1980 roku, kiedy to prof. R. Sikora został włączony do zespołu profesora Zdzisława Pawłowskiego z IPPT PAN. Dotyczyło to realizacji projektu zorganizowanego w ramach Centralnego Problemu Badań Podstawowych 02.20. Całość prac koordynował doc. Kalewski z Politechniki Warszawskiej. Część koordynowana przez prof. Z. Pawłowskiego dotyczyła zapewnienia bezpieczeństwa projektowanej elektrowni jądrowej w Żarnowcu. Prof. R. Sikora zorganizował zespół zajmujący się badaniami nieniszczącymi na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej. Początkowo w zespole brali udział tylko pracownicy KETiI: prof. Ryszard Sikora, prof. Wojciech Lipiński, prof. Ryszard Pałka, prof. Marek Gawrylczyk, prof. Stanisław Gratkowski, dr hab. Marek Ziółkowski i dr Modest Gramz. Następnie do zespołu dołączył prof. Jan Sikora z Politechniki Warszawskiej i Lubelskiej ze swoimi współpracownikami. W następnej kolejności do zespołu dołączył dr hab. T. Chady i dr hab. Inż. Piotr Baniukiewicz.

Zespół kierowany przez prof. R. Sikorę, a następnie przez dr hab. T. Chadego ulegał ciągłym naturalnym zmianom. Niestety nie żyją już dr Modest Gramz i prof. Wojciech Lipiński. Od wielu lat pracuje w Niemczech w dziedzinie badań nieniszczących dr hab. inż. Marek Ziółkowski. Odłączył się i stworzył własny zespół badawczy prof. Stanisław Gratkowski. Przez wiele lat współpracował z nim dr Mieczysław Komorowski. Prof. Konstanty Marek Gawrylczyk i prof. Ryszard Pałka są kierownikami katedr. Dr hab. inż. Piotr Baniukiewicz przed habilitacją został przeniesiony do innej katedry tak samo jak dr hab. inż. Marek Ziółkowski. Nie współpracuje z zespołem prof. Jan Sikora, który prowadzi obecnie badania w dziedzinie tomografii impedancyjnej na Politechnice Lubelskiej. Są to w większości naturalne procesy zmian, zespoły powstają, krzepną i rozpadają się. Zespół NDT w KETiI uległ naturalnemu przekształceniu i od dłuższego czasu jest kierowany w innym składzie przez dr. hab. Tomasza Chadego. Kluczowymi dla rozwoju naukowego każdego zespołu jest współpraca i kontakty międzynarodowe. Prof. R. Sikora od wielu lat jest członkiem World Federation of Nondestructive Evaluation Centers z Iowa State University oraz członkiem komitetu naukowego chińskiej konferencji naukowej Far East Nondestructive Testing Forum. Był on także członkiem komitetu naukowego Światowej Konferencji Badań Nieniszczących zorganizowanej w 2012r. w Durbanie (RPA). Prof. Sikora jest członkiem komitetów naukowych Krajowych Konferencji Badań Nieniszczących. Dr hab. inż. T. Chady, prof. ZUT rozwijał badania nieniszczące przez cztery lata pracując w Oita University w Japonii. Dwa lata temu został Prezesem Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP. Dr hab. T. Chady prof. ZUT jest członkiem komitetów naukowych Krajowych Konferencji Badań Nieniszczących (KKBN), konferencji Far East Nondestructive Testing Forum (FENDT) i International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation

(ENDE). Bierze także udział w pracach World Federation of Nondestructive Evaluation Centers. Prof. R. Sikora i dr hab. T. Chady prof. ZUT oprócz przynależności do SEP i PTETIS są także członkami SIMP. W 2010 roku dr hab. T. Chady zorganizował w Szczecinie International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE), a w 2015 roku był przewodniczącym Międzynarodowego Seminarium Naukowego ISTET'15 podczas, którego były również prezentowane prace z dziedziny badań nieniszczących.

Kluczową sprawą dla prowadzenia intensywnych badań naukowych jest zaangażowanie w realizację projektów badawczych. Ostatnie projekty, którymi kierował prof. R. Sikora to realizowany w ramach 6-tego programu ramowego projekt FilmFree koordynowany przez TWI (oddział w Cambridge) i krajowy projekt Inteligentny System Analizy Radiogramów (ISAR) realizowany w ramach NCBiR. Po zrealizowaniu grantu ISAR prof. R. Sikora postanowił osobiście nie starać się już o kolejne projekty. Dr hab. T. Chady prof. ZUT także kierował kilkoma projektami krajowymi i międzynarodowymi z 7-ego programu ramowego. Obecnie, pod jego kierownictwem jest realizowany projekt CASELOT dotyczący automatycznej identyfikacji defektów w połączeniach spawanych. Swoje zainteresowania badawcze dr hab. T. Chady prof. ZUT koncentruje na wykorzystaniu sztucznej inteligencji w badaniach nieniszczących, badaniach terahercowych, badaniach materiałów kompozytowych, badaniach magnetycznych i wiroprowodowych.

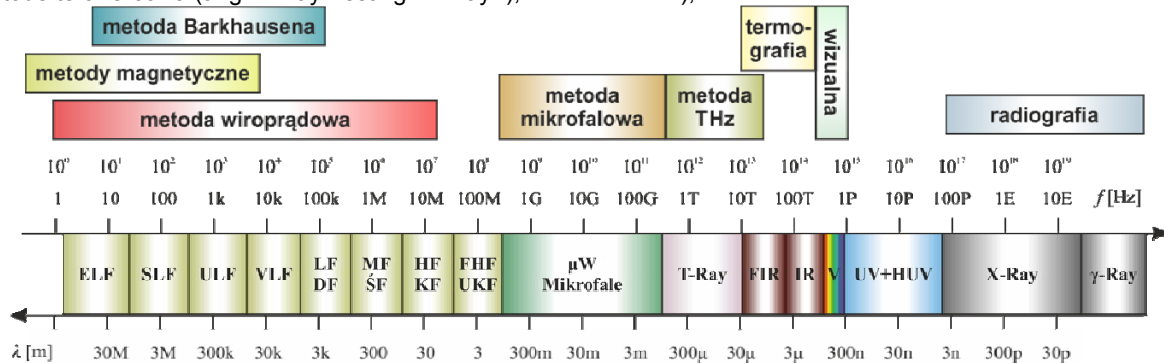
O intensywności prac w dziedzinie BN prowadzonych w KETiI świadczy również dość duża liczba zrealizowanych doktoratów i habilitacji. Doktoraty w dziedzinie badań nieniszczących uzyskali: T. Chady, P. Baniukiewicz, P. Łopato, M. Caryk i G. Psuj. Habilitacje w dziedzinie badań nieniszczących uzyskali: T. Chady, M. Ziółkowski i P. Baniukiewicz. W końcowej fazie przygotowania habilitacji są: dr P. Łopato i dr G. Psuj. Należy postawić pytanie z jakich powodów badania nieniszczące są tak silnie umocowane na Wydziale Elektrycznym ZUT (dawnej Politechnice Szczecińskiej). Analizując prace przedstawiane na konferencjach Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE) stwierdzono, że około 50% przedstawionych tam prac związanych jest z badaniami ultradźwiękowymi, a około 25% z metodami elektromagnetycznymi. Pozostałe prace związane są z metodami optycznymi, termicznymi oraz mieszanymi. Jak wynika z tej analizy poważną część prac związana jest z elektromagnetyzmem i to jest głównym powodem zainteresowania elektryków badaniami nieniszczącymi. Oprócz tego nawet w metodach nie mających niczego wspólnego z elektromagnetyzmem wykorzystywane są przetworniki i sprzęt z bogatym wyposażeniem elektrycznym i elektronicznym. Jednak, w zdecydowanej większości przypadków BN mieszczą się w obszarze mechaniki lub fizyki.

Kategoria elektromagnetycznych metod badań nieniszczących obejmuje te techniki, w których do wykrywania nieciągłości materiałowych wykorzystano ich interakcje z polem elektrycznym, magnetycznym lub promieniowaniem elektromagnetycznym. Przyjmując takie kryterium kwalifikacji do metod elektromagnetycznych można zaliczyć znaczącą część używanych metod NDT, a spektrum używanych częstotliwości obejmuje praktycznie cały dostępny zakres poczynając od pól stałych, a kończąc na dziesiątkach teraherców (Rys. 1).

Wśród najbardziej popularnych elektromagnetycznych metod testowania wymienić można:

- metodę potencjałową (impedancyjną) (ang. Potential Drop Method),

- metodę prądów wirowych (ang. Eddy-Current Testing – ECT),
- metodę strumienia rozproszenia (ang. Magnetic Flux Leakage Testing – MFLT),
- metodę szumów Barkhausena (ang. Barkhausen Noise Testing – BNT),
- metode terahercowa (ang. T-Ray Testing – TRayT),
- termografię aktywną w podczerwieni ze wzbudzeniem prądami wirowymi lub mikrofalowym (ang. Infrared and Thermal Testing – IR),
- radiografia komputerowa (ang. Computed Radiography – XRay-CR),
- radiografia cyfrowa (ang. Digital Radiography – XRay-DR),



Rysunek 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego i zakresy częstotliwości wykorzystywane w badaniach nieniszczących (ELF – ang. *Extremely Low Frequency*, SLF – ang. *Super Low Frequency*, ULF – ang. *Ultra Low Frequency*, VLF – ang. *Very Low Frequency*, LF – fale długie (ang. *Low Frequency*), MF – fale średnie (ang. *Medium Frequency*), HF – fale krótkie (ang. *High Frequency*), VHF – fale ultrakrótkie (ang. *Very High Frequency*), μW – mikrofałe (ang. *Microwaves*), T-Ray – promieniowanie terahercowe (ang. *Terahertz Radiation*), FIR – daleka podczerwień (ang. *Far Infrared*), IR – podczerwień (ang. *Infrared*), V – pasmo widzialne (ang. *Visible*), UV – nadfiolet (ang. *Ultraviolet*), HUV – skrajny nadfiolet (ang. *High Ultraviolet*), X-Ray – promieniowanie Rentgenowskie, γ -Ray – promieniowanie gamma (ang. *Gamma Ray*).

3. Metoda prądów wirowych

Defektoskopia prądów wirowych [2] jest jedną z najprostszych i najtańszych metod badań nieniszczących. Posiada jednak szereg wad, np. stosunkowo małą czułość, niezbyt dobrą rozdzielczość i jakość obrazowanych wad. Ma jednak kilka zalet. W celu zmniejszenia niedostatków metody prądów wirowych doskonalone są algorytmy obróbki sygnałów, sondy oraz sprzęt i oprogramowanie defektoskopów. Prowadzone są też prace mające na celu budowę defektoskopów inteligentnych.

Metoda prądów wirowych jest powszechnie używana do testowania metali. Są one dobrymi przewodnikami. Obszar jej zastosowań to: bezelektrodowy pomiar konduktywności elektrycznej przy wyższych temperaturach, określanie oddziaływania korozji zewnętrznej i międzykrystalicznej, ilościowa ocena udziału elektrycznej przewodności i przekroju próbki przy odkształceniach plastycznych i elastycznych, śledzenie przebiegu oddziaływania hartowania i starzenia na konduktywność i średnicę próbki, rejestracja pierwszych pęknięć naprężeniowych i pomiar pogłębienia się rys, rejestracja nieodwracalnych zmian konduktywności i przekroju próbki przy próbach zmęczeniowych, śledzenie zjawisk dyfuzji w układach wielowarstwowych oraz wykrywanie wad odosobnionych a także w obecności zakłóceń wywołanych nierównościami powierzchni i obecnością pomocniczych elementów. Jest ona też wykorzystywana do testowania złożonych struktur np. konstrukcji żelazobetonowych.

Są też próby wykorzystania metody prądów wirowych do testowania materiałów o małej konduktywności. Materiałami o małej konduktywności mogą być półprzewodniki, dielektryki rzeczywiste lub tkanki biologiczne, które można traktować jako dielektryki rzeczywiste. Są czynione próby wykorzystania metody prądów wirowych w diagnostyce medycznej.

Metoda prądów wirowych obok wad ma wiele zalet. Jest bezpieczna dla otoczenia i obsługi. Defektoskopy wiropądowe można łatwo automatyzować i stosować nawet w bardzo trudnych warunkach zewnętrznych. Obecnie są one używane w: przemyśle metalowym, i energetyce (szczególnie w jądrowej). Do rozwoju badań

nieniszczących z pomocą prądów wirowych, przyczynił się Friedrich Förster z Reutlingen.

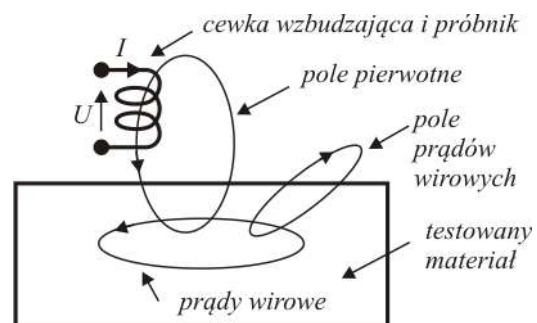
Ideę metody prądów wirowych można wytłumaczyć na dwa sposoby. Pierwszy sposób polega na pomiarze pola magnetycznego prądów wirowych. Mierzone są zmiany pola magnetycznego wywołane wadami lub niejednorodnościami występującymi w testowanym materiale. Do pomiaru rozkładu indukcji magnetycznej są wykorzystywane różnego rodzaju czujniki pola magnetycznego, w tym cewki.

Drugie wytłumaczenie opiera się na potraktowaniu testowanego materiału jako wtórnego, zwarteo uzwojenia transformatora, składającego się z cewki (cewek) wzbudzenia i testowanego materiału. Wady występujące w testowanym materiale, zmieniają impedancję wejściową cewki (cewek) wzbudzenia lub cewek z nią sprzężonych.

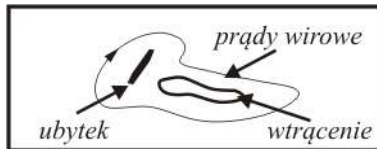
3.1. Podstawy defektoskopii wiropądowej [2, 3, 4]

Przedstawimy pierwszą interpretację metody prądów wirowych.

Defektoskopia prądów wirowych wykorzystuje zjawisko reakcji prądów wirowych. Na rysunku 2 pokazano cewkę znajdującą się nad materiałem przewodzącym. Jest ona zasilana prądem zmiennym.



Rys.2. Idea defektoskopii wiropądowej.



Rys.3. Wada i wtrącenie

Strumień magnetyczny Φ indukuje w materiale zmienne pole elektryczne, które wywołuje prądy wirowe. Ich rozptyw jest zakłócany przez wady (deformacje, ubytki lub wtrącenia). Przedstawiono to na rysunku 3. Prądy wirowe indukują pole magnetyczne nakładające się na pole magnetyczne wzbudzone przez cewkę. Powyższe zjawisko jest opisane pierwszym i drugim równaniem Maxwella:

$$(1) \quad \text{rot } \underline{\mathbf{H}} = \gamma \underline{\mathbf{E}} + \varepsilon \frac{\partial \underline{\mathbf{E}}}{\partial t}$$

$$(2) \quad \text{rot } \underline{\mathbf{E}} = -\mu \frac{\partial \underline{\mathbf{H}}}{\partial t}$$

Dla wymuszenia harmonicznego równania (1) i (2) przybierają następującą postać:

$$(3) \quad \text{rot } \underline{\mathbf{H}} = \gamma \underline{\mathbf{E}} + j \omega \varepsilon \underline{\mathbf{E}}$$

$$(4) \quad \text{rot } \underline{\mathbf{E}} = -j \omega \mu \underline{\mathbf{H}}$$

W przypadku gdy spełniona jest nierówność:

$$(5) \quad \gamma \gg j \omega \varepsilon$$

równanie (3) upraszcza się do postaci:

$$(6) \quad \text{rot } \underline{\mathbf{H}} = \gamma \underline{\mathbf{E}}$$

Wtedy zmienne pole magnetyczne wzbudza prądy przewodzenia, wielokrotnie większe od prądów przesunięcia. Uwzględniane są więc prądy przewodzenia a prądy przesunięcia pomijane. Gdy spełniona jest nierówność:

$$(7) \quad \gamma \ll \omega \varepsilon$$

równanie (3) upraszcza się do postaci:

$$(8) \quad \text{rot } \underline{\mathbf{H}} = j \omega \mu \underline{\mathbf{E}}$$

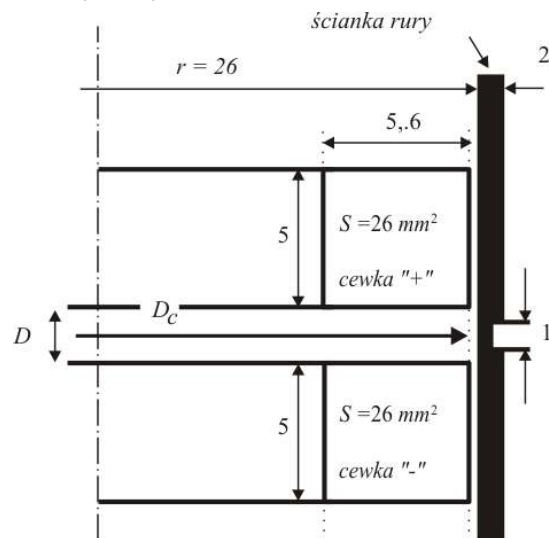
W tym przypadku uwzględniane są tylko prądy przesunięcia wzbudzone w materiale. Niezależnie od tego z jakim zjawiskiem mamy do czynienia, to znaczy, czy muszą być uwzględniane oba rodzaje prądów (3), czy tylko jeden z nich (5) lub (7), zasada działania defektoskopii prądów wirowych jest taka sama. Rozkład wypadkowego pola magnetycznego zależy od jednorodności lub niejednorodności testowanego materiału. Niejednorodności występujące w testowanym materiale wywołują nierównomierny rozptyw prądów wirowych, a one indukują nierównomierne pole magnetyczne reakcji.

3.2. Wykres impedancji sondy różnicowej przy testowaniu rur (na podstawie [5])

Jednym z częściej testowanych obiektów metodą prądów wirowych są stalowe rury. Są one wykonywane ze stali o niskiej zawartości węgla lub ze stali stopowych np. Inconelu. Rury wykonane ze stali o niskiej zawartości węgla są stosowane w transporcie gazów i cieczy. Rury z Inconelu w przemyśle nuklearnym. Zespół prowadził szereg wspólnych prac z Uniwersytetem w Oita (Japonia) dla potrzeb przemysłu nuklearnego. W niniejszym artykule przedstawimy symulacyjne wyniki badanie rur.

Na rysunku 4 przedstawiono analizowany układ. Wymiary podano w milimetrach. Wadą jest osiowosymetryczne wyżłobienie na zewnętrznej bądź

wewnętrznej ścianki rury. Cewkę różnicową umieszczono wewnątrz rury.



Rys. 4. Cewka różnicowa i defekt w ścianie rury

Ze względu na symetrię względem osi rury rozważania wystarczy ograniczyć do połowy przekroju rury. Rozważany obszar podzielono na elementy trójkątne. W obliczeniach wykorzystywano siatkę elementów prostokątnych. Posłużono się biliniową aproksymacją wewnątrz elementów. Wymiary elementu powinny być porównywalne z głębokością wnikania fali. Dla materiału o konduktywności $\gamma = 2 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ i przenikalności magnetycznej $\mu = \mu_0$ dla najwyższej badanej częstotliwości $f = 1 \text{ MHz}$ daje to oszacowanie

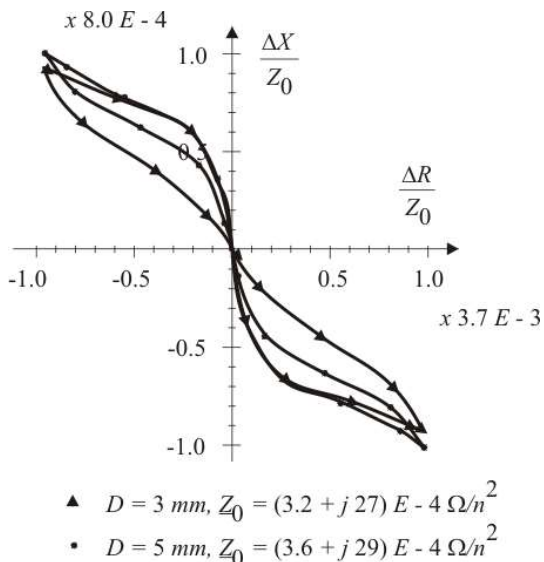
$$(9) \quad d_r \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{5}{f}} \cong 0,36 \text{ mm}$$

gdzie: d_r – wymiar elementu skończonego wewnątrz rury w kierunku promienia r .

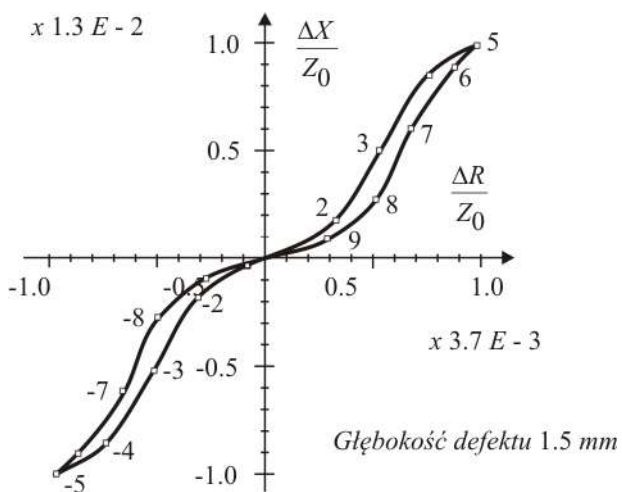
Ocenę czułości układu umożliwiają trajektorie impedancji cewki różnicowej poruszającej się wewnątrz rury. Sposób tworzenia trajektorii opiszemy korzystając z rys. 4. Cewka różnicowa przemieszczana jest wewnątrz rury z wadą zewnętrzną. W położeniu zerowym wada znajduje się dokładnie w środku cewki różnicowej. Zmiany rezystancji i reaktancji podczas przemieszczania cewki wewnątrz rury odnoszone są do modułu impedancji cewki umieszczonej wewnątrz rury bez wady. Parametrem rodziny krzywych jest odległość między cewkami. Znaczniki na krzywych odpowiadają kolejnym położeniom cewki względem wady. W każdym kolejnym kroku odległość środka cewki różnicowej od wady (wzdłuż osi z) przy jej przemieszczaniu w jednym kierunku rośnie o 1 mm . W pewnym oddaleniu środka cewki od środka wady, zmiany impedancji są maksymalne, następnie maleją do zera podczas zwiększania odległości cewki od wady. Krzywe są symetryczne względem początku układu. Impedancję obliczano z pomocą metody elementów skończonych. W obliczeniach przyjęto, że rura wykonana jest z materiału o konduktywności $2 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, a częstotliwość $f = 50 \text{ kHz}$. Na rysunku 5 przedstawiono trajektorię impedancji podczas wykrywania wady wewnętrznej, a na rysunku 6 zewnętrznej. Ważnym problemem jest dobór częstotliwości prądu wzbudzającego pole magnetyczne w ścianie rury. Częstotliwość optymalną dla danej wady, przy której zmiany impedancji cewki są największe, możemy znaleźć posługując się wykresem przedstawionym na rysunku 7.

Sporządzając wykres założono, że środek cewki różnicowej jest przesunięty o 5 mm w stosunku do środka wady.

Wykrywanie wad w rurach ma istotne znaczenie w procesie testowania wymienników ciepła w elektrowniach jądrowych. W reaktorach konstrukcji Westinghouse wymienniki ciepła zbudowane są z rurek Inconel o średnicy około 20 mm. Rurki mają długość kilku metrów, w związku z tym są mocowane w płytach stalowych. Szczególnie trudne jest wykrywanie małych wad zewnętrznych w obszarze rurki objętym płytą. Problem ten został szczegółowo opisany w [6].



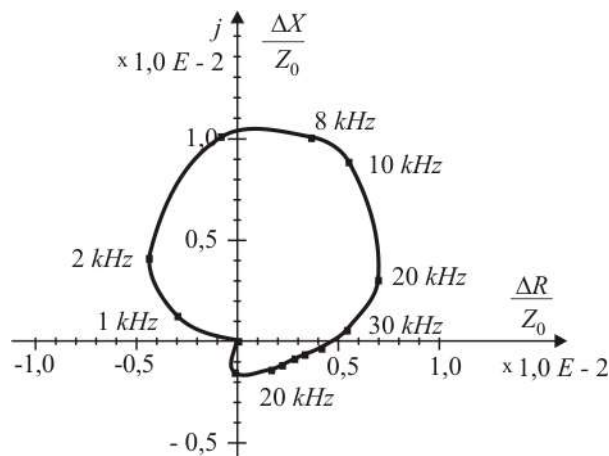
Rys. 5. Zmiana impedancji czujnika różnicowego wewnątrz rury podczas przemieszczania go koło defektu zewnętrznego. Głębokość defektu 1,5 mm, D – odstęp między cewkami.



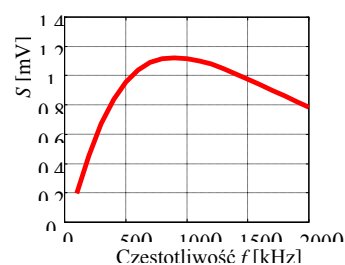
Rys. 6. Zmiana impedancji czujnika różnicowego wewnątrz rury podczas przemieszczania go koło defektu zewnętrznego. Głębokość defektu 1,5 mm, D - odstęp między cewkami

Dr hab. T. Chady zaproponował jako rozwiązanie tego problemu wielczęstotliwościową metodę wiroprowadową. W metodzie wielczęstotliwościowej do detekcji i identyfikacji stanu badanego materiału wykorzystuje się informację uzyskaną z analizy sygnałów o różnych częstotliwościach [7]. Ze względu na różną głębokość penetracji, sygnały o niskiej częstotliwości niosą ze sobą informację o głębiej położonych defektach, natomiast sygnały o wysokich częstotliwościach pozwalają głównie na identyfikację stanu warstw powierzchniowych i podpowierzchniowych. Jednoczesny pomiar, przetwarzanie i prezentacja sygnałów

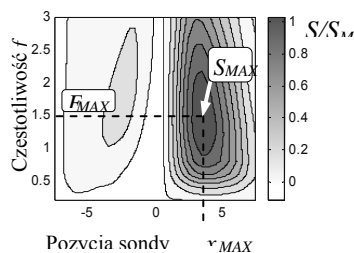
o różnych częstotliwościach umożliwia bardziej precyzyjną identyfikację defektów oraz eliminację wpływu zewnętrznych elementów zakłócających. Ponadto, sygnały o zbliżonych częstotliwościach są ze sobą silnie skorelowane, co można wykorzystać do bardziej efektywnej eliminacji zakłóceń. Dla celów defektoskopii wiroprowadowej zdefiniowano „charakterystykę częstotliwościową sygnału defektu” jako wykres amplitudy S sygnału względem częstotliwości f , a spektrogram jako wykres amplitudy S sygnału względem częstotliwości f i położenia przetwornika x, y . W przypadku przesuwania przetwornika w jednym kierunku otrzymywany jest wykres dwuwymiarowy funkcji $S(x, f)$, a jeśli przetwornik przemieszczany jest w dwóch osiach, to uzyskujemy trójwymiarowy wykres funkcji $S(x, y, f)$. Amplituda S zdefiniowana została jako różnica pomiędzy amplitudą danej harmonicznej otrzymaną dla bieżącego punktu a amplitudą zmierzoną w miejscu, gdzie założono, że badany materiał nie zawiera żadnych niejednorodności. Przykładową charakterystykę częstotliwościową sygnału defektu przedstawiono na rys. 8, a dwu i trójwymiarowe spektrogramy otrzymane z pomiarów przeprowadzonych dla sztucznych defektów materiałowych zamieszczone zostały odpowiednio na rys. 9 i rys. 10.



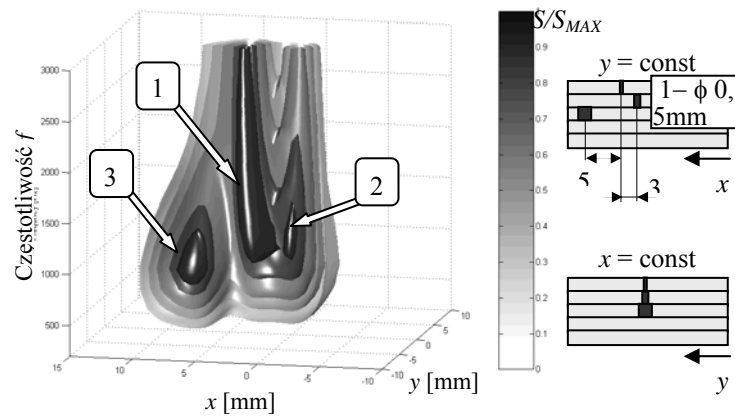
Rys. 7. Zmiana impedancji czujnika różnicowego wewnątrz rury 30 mm podczas wykrywania defektu zewnętrznego. Odstęp między cewkami 2mm. Głębokość defektu 1,5 mm



Rys. 8. Przykład charakterystyki częstotliwościowej sygnału $S(f)$ zmierzonej dla defektu podpowierzchniowego



Rys. 9. Przykład dwuwymiarowego spektrogramu $S(x, f)$ zmierzonego dla defektu podpowierzchniowego.

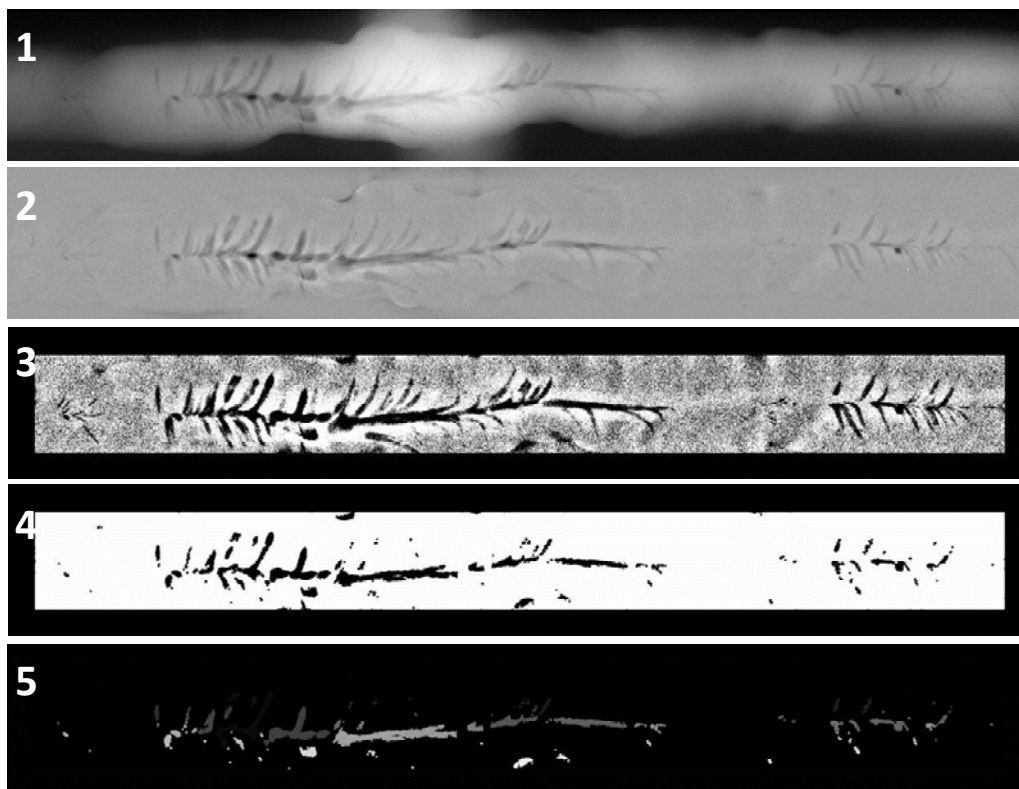


Rys. 10. Przykład trójwymiarowego spektrogramu $S(x,y,f)$ zmierzony dla defektu o złożonej strukturze przedstawionej na rysunku

Można zaobserwować, iż charakterystyka częstotliwościowa sygnału defektu i spektrogramy mają wyraźnie widoczne ekstrema, których parametry są w ścisłej zależności z właściwościami defektu. Defekty zlokalizowane po stronie przetwornika lub blisko pod powierzchnią powodują sygnał mający maksimum dla wyższych częstotliwości. Im głębiej zlokalizowany jest defekt, tym niższa jest częstotliwość, dla której występuje maksimum sygnału. Postępując się tylko tę prostą zasadą, bez konieczności przeprowadzania szczegółowej analizy, możliwe jest na podstawie obserwacji spektrogramów przybliżone określenie parametrów defektów.

4 Inne metody testowania

Dr hab. Tomasz Chady wraz z prof. R. Sikorą rozwinęli w KETiI kilka innych metod badań nieniszczących. Pierwszym przykładem są badania radiograficzne i automatyczna identyfikacja defektów na podstawie analizy radiogramów. W procesie tym, uzyskany obraz (Rys. 11.1) podlega kolejnej obróbce: ekstrakcji tła (Rys. 11.2), progowaniu (Rys. 11.3), operacji zamknięcia (Rys. 11.4) i indeksacji (Rys. 11.5).



Rys. 11 Przetwarzanie obrazu spawu.

Tak przygotowany obraz jest przetwarzany za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji. W tym celu zebrano bazę

danych zawierającą 1500 wad opisanych 26 cechami. Zdjęcia spawów z opisem dostarczył mgr inż. Bogdan

Piekarczyk prezes firmy TechnicControl. Układ automatycznej identyfikacji defektów określa rodzaj automatycznie wykrytej wady wykorzystując metody: sztucznych sieci neuronowych, logiki rozmytej i teorii zbiorów przybliżonych. Najlepsze wyniki osiągnięto z pomocą zbiorów przybliżonych. Kolejna intensywnie rozwijana metoda polega na wykorzystaniu fal o częstotliwościach terahercowych. Pozwala ona na precyzyjne testowanie materiałów kompozytowych [8]. Inną zaletą metody terahercowej jest możliwość wykorzystania jej do wykrywania zmian nowotworowych.

Obecnie prof. R. Sikora i dr hab. T. Chady prowadzą prace mające na celu zbudowanie inteligentnego systemu wykrywania raka piersi. W tych pracach są wykorzystywane wyniki uzyskane w trakcie realizacji projektu ISAR.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono w skrócie rozwój badań nieniszczących w KETi ZUT. Nie przedstawiono prac prowadzonych przez prof. S. Gratkowskiego i innych byłych członków tego zespołu wykonanych po jego opuszczeniu. Praca powstała w związku z 60-cio leciem pracy naukowej prof. Ryszarda Sikory.

Autorzy: prof. zw. dr inż. Ryszard Sikora dr h.c., Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: rs@zut.edu.pl; dr hab. inż. Tomasz Chad prof. ZUT, E-mail: tchady@zut.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Thompson D. O.: Evolution of QNDE'S CORE INTERDISCIPLINARY SCIENCE AND ENGINEERING BASE
- [2] Sikora R.: ELEKTROMAGNETYCZNE METODY TESTOWANIA MATERII, Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK, Warszawa 2003.
- [3] Bray D. E.: Nondestructive Evaluation, CRC Press, New York, 1997.
- [4] Sikora R.: Teoria pola elektromagnetycznego, WNT, wyd. 3, Warszawa 1997.
- [5] Sikora R., red.: Algorytmy defektoskopii wiropądowej, PNP Szczecińskiej, Szczecin, 1992.
- [6] Huang H., Takagi T., Fukotomi H.: Numerical Analysis of Eddy Current Testing for Steam Generator Tubes with a Support Plate, IOS Press, Amsterdam, 1999.
- [7] Chady T., Enokizono M., „Multi-frequency exciting and spectrogram-based ECT method”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, t. 215, pp. 700–703, June 2000
- [8] Sikora R., Chady T., Baniukiewicz P., Napierała L., Łopato P., Piekarczyk B., Pietruszewicz T., Psuj G. SPRAWOZDANIE Nr 4 z wykonania projektu rozwojowego nr N R01 0037 06/2000 "Inteligentny system analizy radiogramów", Zadanie 4: "Opracowanie algorytmów ekstrakcji obiektów ze zdjęć radiograficznych oraz budowa bazy defektów", Styczeń 2011.
- [9] Sikora R., Baniukiewicz P., Chady T., Łopato P., Psuj G., Grzywacz B., Misztal L. "Artificial Intelligence in Nondestructive Evaluation", FENDT FORUM 2013.
- [10] Chady T., Łopato P., "Testing of glass-fiber reinforced composite materials using terahertz technique", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 33(3):1599-1605 · January 2010.



24 maja odbyło się na Wydziale Elektrycznym ZUT w Szczecinie posiedzenie Komitetu Elektrotechniki PAN. Wydarzenie połączone było z jubileuszem 60-lecia pracy naukowej i dydaktycznej dwóch Doktorów honoris causa szczecińskiej uczelni, Profesorów: Ryszarda Sikory – wychowawcy wielu autorzytetów elektrotechniki oraz Adam Żuchowskiego – współtwórcy polskiej szkoły miernictwa dynamicznego więcej str.297