



Whitepaper:

Badania nieniszczące

Diagnostyka w nowoczesnym wydaniu

1. Wstęp

1.1. Trochę teorii...

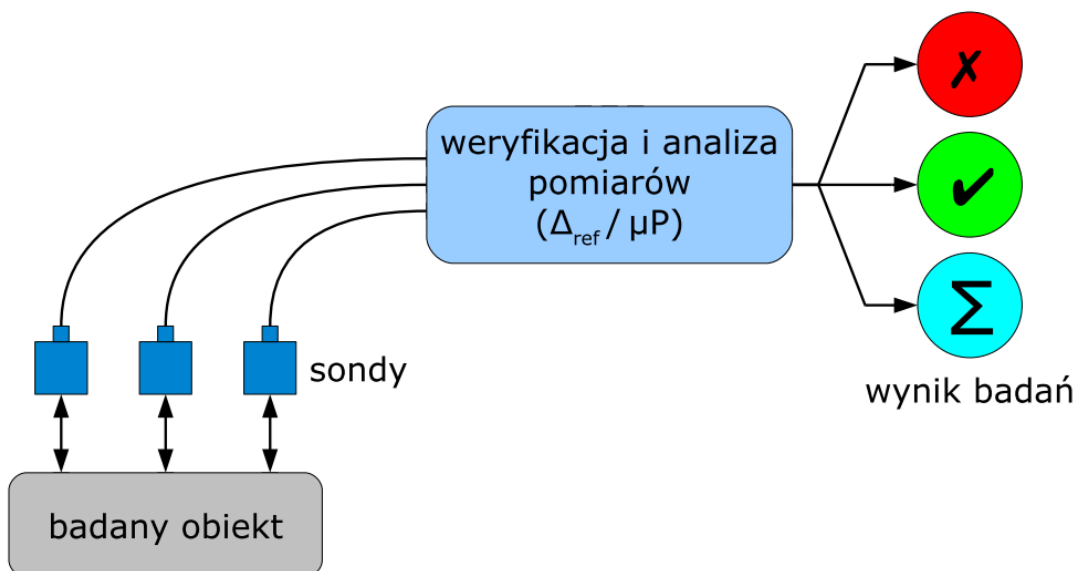
Badania nieniszczące (ang. Non-Destructive Testing – NDT) są to badania, które umożliwiają uzyskanie informacji o stanie, właściwościach i ewentualnych wadach badanej struktury czy materiału bez ingerowania w cechy użytkowe tego obiektu. W przeciwieństwie do tak zwanych badań niszczących, badania NDT oceniają stan obiektu bez fizycznej ingerencji w jego strukturę, przez co są pod względem eksploatacyjnym tańsze.

Co zostało już wspomniane, ale czemu należy się specjalna uwaga – badania nieniszczące mają szerszy zakres zastosowań od badań niszczących. Główna i najważniejsza przewaga NDT to możliwość określania właściwości i uzyskiwania dokładnego opisu fizycznego danego materiału. Stosując odpowiednie algorytmy możliwe jest określenie właściwości termicznych, wytrzymałościowych, elektromagnetycznych materiału bez jego spalania, przegrzewania, łamania, gięcia, obciążania, czy niszczenia na skutek prób z wykorzystaniem prądu elektrycznego.

Metody badań nieniszczących znajdują zatem zastosowanie w ekonomicznych procedurach oceny niezawodności oraz jakości produktów będących w trakcie procesu technologicznego jak i gotowych. Głównymi obszarami działań NDT są przemysł lotniczy, energetyczny, motoryzacyjny, petrochemiczny oraz przesyłu gazów i cieczy we wszystkich ich aspektach konstrukcyjnych. Metody badań nieniszczących często stosuje się również w laboratoriach i ośrodkach naukowych przy projektowaniu i określaniu właściwości nowych materiałów.

1.2. System NDT

Poniższa ilustracja przedstawia ogólny schemat systemu badań nieniszczących:



Rysunek 1: Schemat systemu do przeprowadzania badań nieniszczących

Sondy mogą spełniać dwie funkcje, które czasami mogą być wykonywane przez jeden i ten sam element (w przypadku wykorzystywania dwukierunkowego zjawiska fizycznego, jakim jest np. zjawisko piezoelektryczne). Pierwszą z nich jest wzbudzenie badanego materiału, czyli dostarczenie energii z zewnątrz w takiej formie, na jaką badany obiekt najlepiej zareaguje. Energia ta może mieć postać np. wibracji, ciepła, światła lub innego promieniowania i może być dostarczana w trybie ciągłym lub chwilowym (impulsowym). Jeśli jednak badania mają charakter bardziej statyczny (żadna energia nie jest dostarczana z zewnątrz), nie stosuje się sond-wzbudników lecz wykorzystuje się energię wewnętrzną układu. Energia ta ma swoje źródło w procesie zachodzącym w układzie, czyli jest związana bezpośrednio z czynnościami wykonywanymi przez urządzenie. Wówczas sondy spełniają tylko funkcję pomiarową.

Kolejnym elementem systemu do badań nieniszczących jest moduł kontrolno-pomiarowy. Obsługuje on zarówno sygnały wyjściowe (sterowanie sondami-wzbudnikami) jak i wejściowe (pochodzące z sond-czujników). W zależności od stosowanej metody badań – statycznej lub dynamicznej – w jego skład może wchodzić generator sygnałów, końcówka mocy, kondycjoner i przetwornik analogowo-cyfrowy. Całość kontrolowana jest za pomocą panelu sterowania, który może być wbudowany w urządzenia przenośne, lub zaimplementowane na komputerze, do którego podłączony jest moduł. Często oprogramowanie do obsługi i sterowania parametrami systemu obejmuje również algorytmy do przetwarzania danych pomiarowych. Algorytmy te mogą polegać na zasadzie porównywania otrzymanego wyniku z modelem referencyjnym lub „po prostu” takim przetworzeniem danych, na podstawie którego uzyskuje się odpowiedź na postawiony problem. Wynikiem oprogramowania analizującego może być stwierdzenie, czy aktualnie badany obiekt jest sprawny, czy jest uszkodzony, a jeśli tak – to jakiego rodzaju i jak wielkie jest to uszkodzenie, lub podanie wartości poszukiwanej właściwości fizycznej.

1.3. Uszkodzenie

Oczywistym jest fakt, iż każda forma uszkodzenia materiału (pęknięcie, rozwarstwienie, korozja, itp.) oprócz naruszenia mechanicznej struktury powoduje również zmiany w innych właściwościach fizycznych – sztywności, gęstości, przewodności elektrycznej i/lub magnetycznej czy impedancji mechanicznej. Dlatego pierwszym krokiem w stosowaniu badań nieniszczących jest zdefiniowanie problemu – co ma być wykryte. Następnie, na podstawie wstępnej specyfikacji oraz istniejących norm i standardów, należy wybrać odpowiednią metodę badań do zaistniałego problemu. Po przeprowadzeniu badań przychodzi czas na najtrudniejsze zadanie (przynajmniej dla niektórych metod, które wymagają dodatkowych nakładów obliczeniowych) – interpretację wyników, czyli znalezienie zależności między zmierzonymi właściwościami lub zaistniałymi zjawiskami fizycznymi a rodzajem i wielkością defektu (jeśli badania wykażą, że badany obiekt jest uszkodzony i takowy defekt istnieje).

2. Metody badań nieniszczących

Istnieje wiele metod badań nieniszczących, wciąż powstają nowe lub stosuje się badania łączące dwie lub więcej metod. Do najczęściej stosowanych należą badania wizyjne, drganiowe, ultradźwiękowe, termograficzne, elektromagnetyczne (w tym najbardziej popularne wibroprądkowe i magnetyczno-proszkowe), radiograficzne, bazujące na technologii laserowej oraz badania emisji akustycznej.

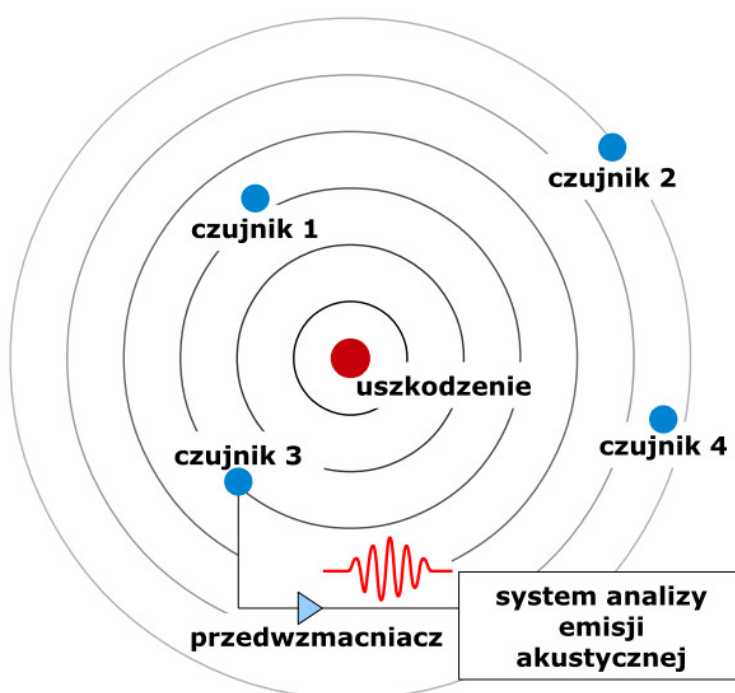
Część z tych metod opisana jest w niniejszym dokumencie.

2.1. Emisja akustyczna

Metoda badań emisji akustycznej (AE) opiera się na pomiarach drgań i dźwięków generowanych przez materiał. Proces taki zachodzi najczęściej w sytuacjach, gdy obiekt jest poddawany obciążeniu (mechanicznemu lub termicznemu) powodującemu zniekształcenia, które to – pośrednio – są źródłem dźwięku.

2.1.1. Źródło sygnału

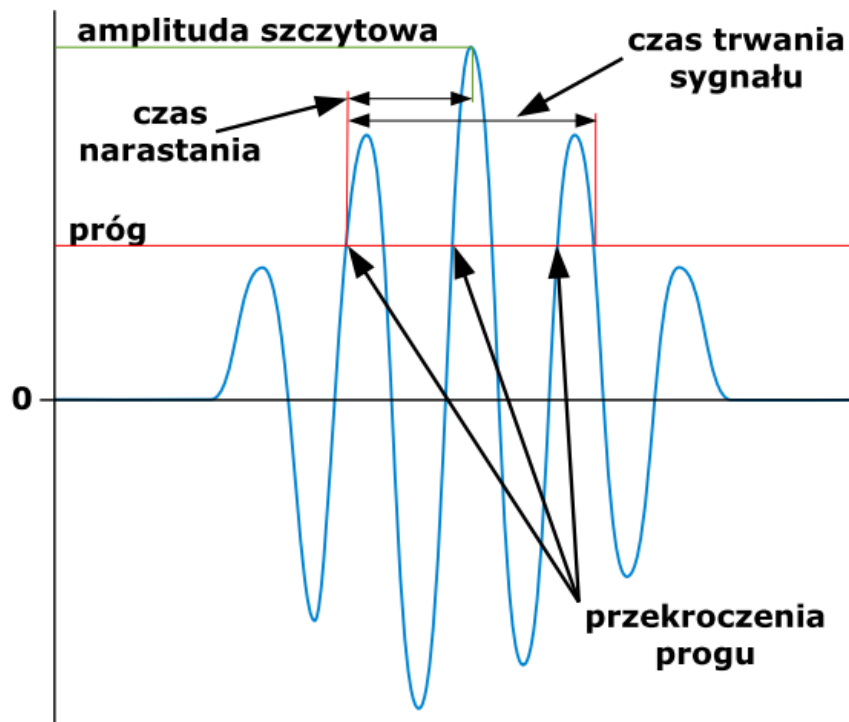
Zjawisku emisji akustycznej towarzyszy gwałtowne uwolnienie energii, która rozchodzi się po strukturze we wszystkich kierunkach (analogicznie do tworzących się kół po wrzuceniu kamienia do wody). Amplituda tych drgań maleje wraz z upływem czasu i wzrostem odległości od centrum, a zasięg drgań zależy od właściwości materiału, kształtu obiektu i otoczenia. Poniższa ilustracja przedstawia zjawisko rozchodzenia się dźwięku w strukturze.



Rysunek 2: Propagacja drgań

Emitowane sygnały akustyczne mogą występować w dwóch postaciach – przejściowej (ang. transient) i ciągłej (ang. continuous). Sygnały przejściowe rejestrowane są jako skutek np. pęknięć i są łatwo odróżnialne od szumu – mają charakter krótkotrwały, impulsowy, a po ich wygaśnięciu pomiar składa się wyłącznie z szumu, który się odfiltrowuje. Natomiast sygnały ciągłe pojawiają się w przypadku występowania wycieków i nieszczelności, mogą mieć zmienną amplitudę i częstotliwość, ale nigdy nie będą wykazywały tendencji do wygaśnięcia do poziomu szumu.

W przypadku sygnałów przejściowych jednym z najważniejszych parametrów emisji akustycznej jest amplituda szczytowa. Jej wartość może świadczyć o charakterze i wielkości uszkodzenia będącego źródłem sygnału. Zakłada się, że bardzo krótkie (poniżej 3 μ s) okresy aktywności z małą liczbą przekroczeń progu (poniżej 3) są traktowane jako zakłócenia eliminowane przez filtry logiczne.



Rysunek 3: Sygnał przejściowy

2.1.2. Zastosowanie, korzyści i ograniczenia

Pomiary i analizy emisji akustycznej najczęściej stosuje się w instalacjach pneumatycznych i hydraulicznych oraz w zbiornikach cieczy i gazów. Zastosowanie tej metody badań nieniszczących pozwala na projektowanie optymalnych rozmiarów podstaw i samych instalacji, wykrywanie uszkodzeń (pęknięć, wycieków, deformacji plastycznych, korozji) czy uniknięcie kosztownych operacji zatrzymania i uruchomienia instalacji (np. osuszanie). Przewaga w stosunku do innych metod nieniszczących uzyskana jest dzięki możliwości badania obiektu w jego normalnych warunkach pracy (zwłaszcza pod obciążeniem) i wykrywaniu powiększających się defektów. Wadami tego rozwiązania są nieczułość uszkodzenia o stałej wielkości (nie dotyczy szczelności), możliwość analizy pomiarów tylko z pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania przez doświadczonego operatora i czułość systemów badań emisji akustycznej na szum.

2.2. Badania drganiowe

Metoda badań drganiowych bazuje na metodzie rezonansowej (ang. resonant inspection, RI) i uproszczonej analizie modalnej. Analiza modalna, jako dziedzina nauki, zajmuje się wyznaczaniem częstotliwości własnych oraz postaci drgań (modów) przypisanych tym częstotliwościom. Dzięki znajomości charakterystyki dynamiki obiektu wiadome jest, w jakich warunkach (pod wymuszeniami o jakiej częstotliwości) dany element nie powinien pracować, aby nie rezonować.

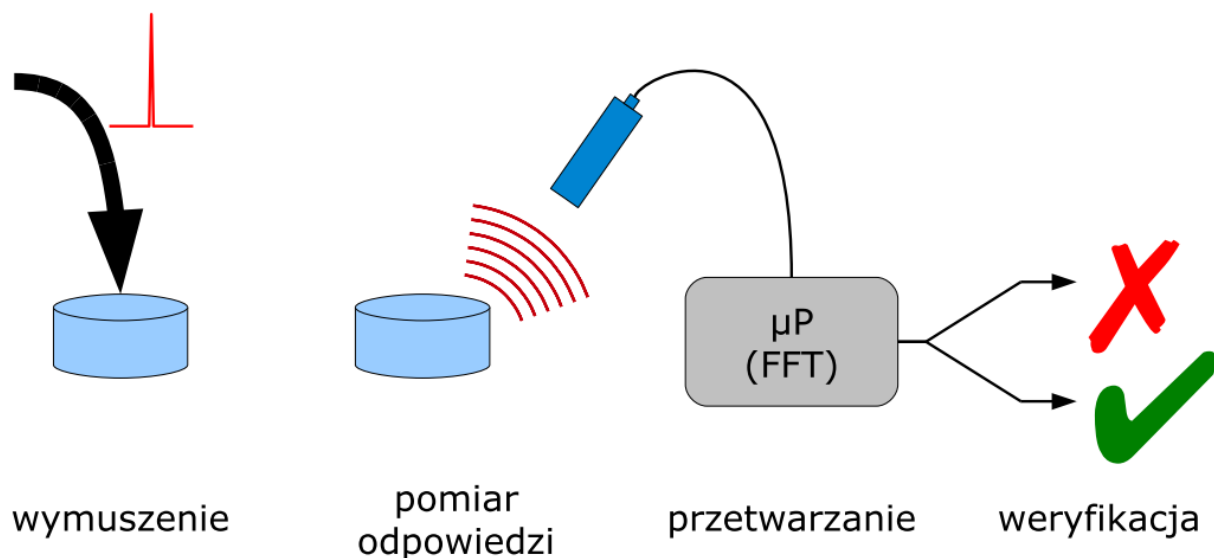
Za pomocą tej metody badań nieniszczących możliwe jest wykrycie takich defektów jak zmiany wymiarów, kształtu, masy, gęstości czy pęknięcia. Co więcej, pominięte lub nieprawidłowo przeprowadzone procesy technologiczne również zostaną zidentyfikowane, ponieważ każde niedociągnięcie technologiczne powoduje zmiany w strukturze materiału, z którego zbudowany jest badany obiekt.

2.2.1. Zjawisko

Każdy przedmiot posiada swoją własną, unikalną charakterystykę drganiową. Rozkład częstotliwości rezonansowych dla sprawnych i nieuszkodzonych elementów powinien być identyczny. Na częstotliwości rezonansów i ich amplitudę bezpośredni wpływ mają właściwości mechaniczne obiektu – jego masa, sztywność i współczynnik tłumienia. Każda zmiana jednej lub więcej cech obiektu powoduje zmianę odpowiedzi elementu na wymuszenie, przez co zmienia się „dźwięk” generowany przez wzbudzony obiekt i widmo jego odpowiedzi. Zmiany pomiędzy charakterystyką rezonansową obiektu badanego a charakterystyką rezonansową obiektu referencyjnego świadczą o istniejącej w danym elemencie usterce.

2.2.2. Przebieg badań

Przebieg nieniszczących badań rezonansowych odbywa się według poniższego schematu:



Rysunek 4: Schemat systemu nieniszczących badań drganiowych

Pierwszym etapem badań jest wzbudzenie testowanego elementu. Wymuszenie ma najczęściej postać impulsu (np. przez uderzenie) i musi być kontrolowane w celu zachowania powtarzalności pomiarów. Wzbudzony obiekt drga w charakterystyczny dla niego sposób, a drgania te są rejestrowane przez mikrofon zarówno w zakresie słyszalnym, jak i w zakresie ultradźwięków. Następnym krokiem jest przetworzenie zebranych danych, czyli transformacja drgań z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości za pomocą transformaty Furiera. Ostatnią czynnością jest porównanie otrzymanego widma z widmem referencyjnym sprawnego detalu. Oprogramowanie decyduje, czy ewentualne zmiany częstotliwości rezonansowych mieszczą się w założonych dopuszczalnych granicach.

Wspomniana kwalifikacja badanego detalu odbywa się na podstawie:

- przesunięcia częstotliwości rezonansowych w zakresie amplitudy i częstotliwości,
- przesunięcia częstotliwości rezonansowych w zakresie częstotliwości z zachowaniem amplitudy,
- przesunięcia i rozszczepienia częstotliwości rezonansowych,
- zaniku częstotliwości rezonansowych.

2.2.3. Zastosowanie

Drganiamiową metodę badań nieniszczących można stosować do wszystkich materiałów wykazujących właściwości rezonansowe – od metali przez ceramiki do kompozytów. Jednak cechą, która daje przewagę tym badaniom nad innymi metodami jest to, że wkomponowanie systemu badań rezonansowych w linię technologiczną w prosty i szybki sposób umożliwia sprawdzenie 100% produktów schodzących z produkcji.

2.3. Badania ultradźwiękowe

Ultradźwiękowa grupa badań nieniszczących (UT) wykorzystuje energię fal akustycznych o wysokiej częstotliwości (50 kHz-25 MHz). Dzięki tym badaniom możliwe jest wykrywanie istniejących wad materiałowych, obserwacja ich powstawania i rozwoju oraz pomiar właściwości fizycznych badanych obiektów – od wymiarów po wartości charakterystyk mechanicznych.

2.3.1. Podstawowe pojęcia

Impedancja akustyczna

Impedancję akustyczną definiuje się jako iloczyn gęstości materiału oraz prędkości dźwięku rozchodzącego się w tym materiale. Ma ona bezpośredni wpływ na charakterystyki wiązek odbitych i przepuszczonych przez dany styk mediów, co opisuje poniższe równanie, według którego oblicza się współczynnik odbicia fali akustycznej na granicy dwóch ośrodków:

$$R = \frac{Z_s - Z_d}{Z_s + Z_d}$$

gdzie:

R – współczynnik odbicia dźwięku na styku dwóch materiałów o różnych impedancjach akustycznych

Z_s – impedancja akustyczna materiału 1 (źródła)

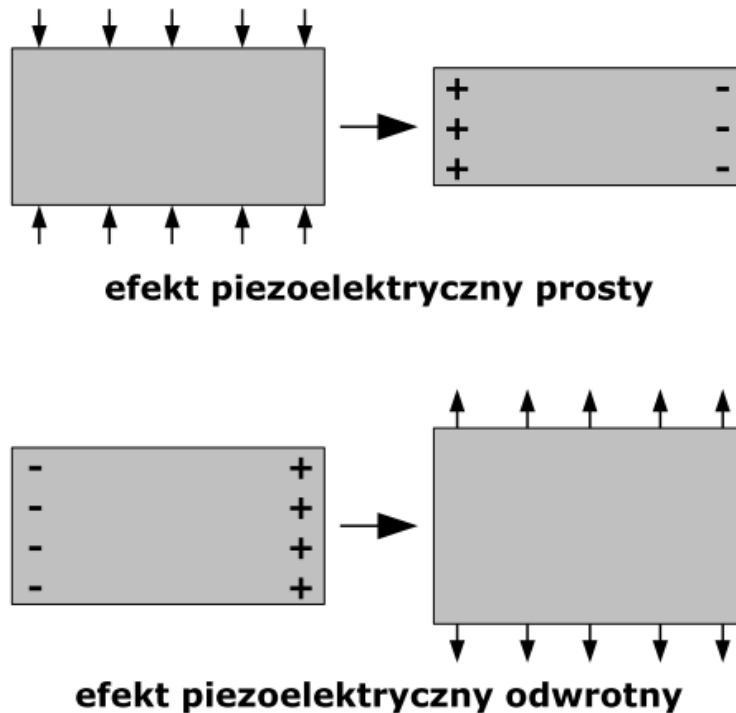
Z_d – impedancja akustyczna materiału 2 (celu)

Pozostała część energii niesionej przez falę akustyczną ($1-R \cdot 100\%$) jest pochłaniana przez ośrodek i przekazywana dalej. Z powyższych zależności wynika, że im mniejszy stosunek między impedancjami generatora drgań ultradźwiękowych (lub medium pośredniczącego) a badanym materiałem, tym większa część energii akustycznej drgań zostanie przekazana do obiektu.

Efekt piezoelektryczny

Elementy piezoelektryczne są zbudowane z materiału, który pod wpływem przyłożonej siły (ściskającej lub rozciągającej) generuje ładunek elektrostatyczny, lub na odwrót – pod wpływem potencjału elektrostatycznego rozszerza się lub kurczy. Ze względu na takie dwukierunkowe działanie, bardzo wysoką czułość oraz stabilność parametrów, są one stosowane jako źródło oraz elementy pomiarowe drgań w zakresie powyżej 20 kHz.

W celu wzbudzenia ultradźwięków, na elektrody piezoaktuatora podawany jest impuls lub sterowany sygnał napięcia elektrycznego powodujący drganie piezokryształu (efekt piezoelektryczny odwrotny). Drgania te przekazywane są pośrednio lub bezpośrednio do badanego materiału. Fala mechaniczna odbijając się, tłumiąc lub przesuając w fazie w wyniku napotkania przeszkody (niejednorodności materiału, czyli defektu) jest rejestrowana i przetwarzana przez czujnik piezoelektryczny na napięcie (efekt piezoelektryczny prosty), którego sygnał zawiera informacje na temat stanu struktury.



Rysunek 5: Schemat efektu piezoelektrycznego

Odbicie, załamanie i dyfrakcja fali ultradźwiękowej

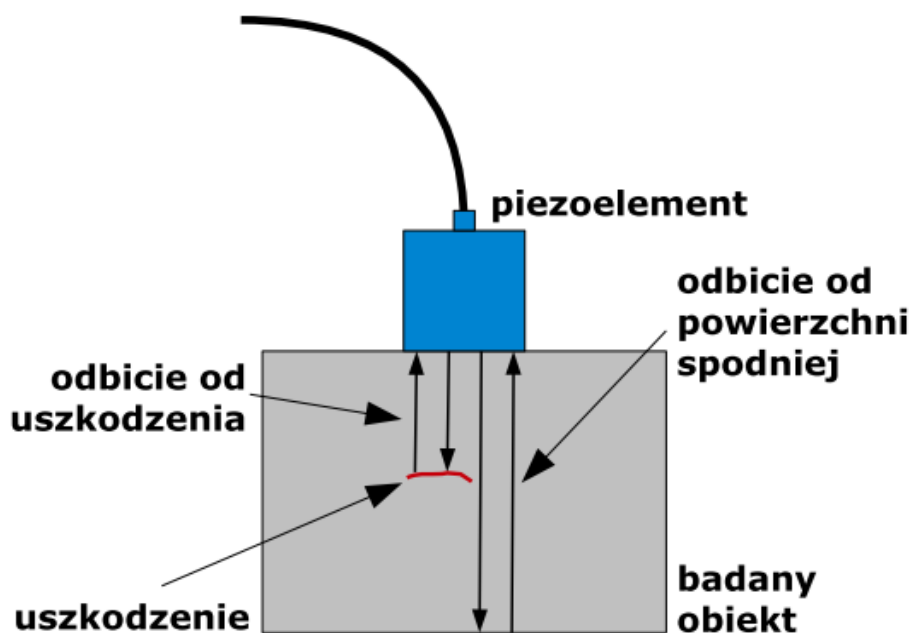
Fala mechaniczna podlega tym samym prawom co fala optyczna – na granicy dwóch ośrodków o różnych impedancjach akustycznych wiązka zostaje rozbita na dwie części – falę odbitą i falę pochłoniętą. Podział energii zależy od stosunku impedancji tych dwóch ośrodków (analogicznie do współczynników załamania światła) – im większy, tym większa część energii zostanie odbita. W przypadku, gdy wiązka ultradźwiękowa pada na powierzchnię materiału pod kątem innym od 90° kąt odbicia fali jest równy kątowi padania. W takiej sytuacji pochłonięta (nieodbita) część drgań ulega załamaniu, czemu towarzyszy, oprócz zmiany kierunku, zmiana prędkości i w niektórych przypadkach modu fali (kierunek drgań cząsteczek wywołujących falę).

2.3.2. Metody badań ultradźwiękowych

Badania ultradźwiękowe można podzielić według kilku kryteriów:

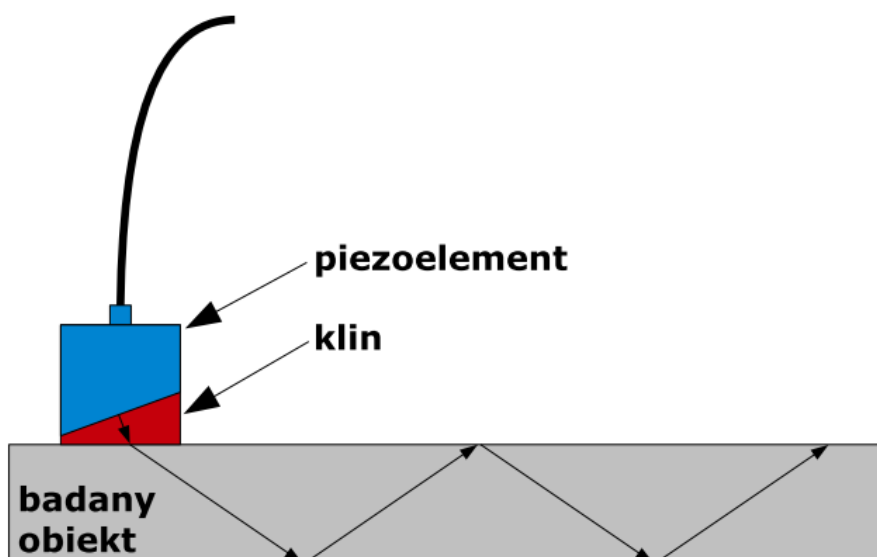
- ze względu na rodzaj użytej fali (modu),
- ze względu na ilość użytych piezoelementów,
- ze względu na sposób rozłożenia piezoelementów,
- ze względu na sposób analizy danych.

Pierwsze podejście dostosowuje rodzaj fali do problemu. W tym przypadku fale podłużne, prostopadłe do powierzchni materiału mogą być użyte do wykrywania równoległych do powierzchni, warstwowych i powierzchniowych uszkodzeń.



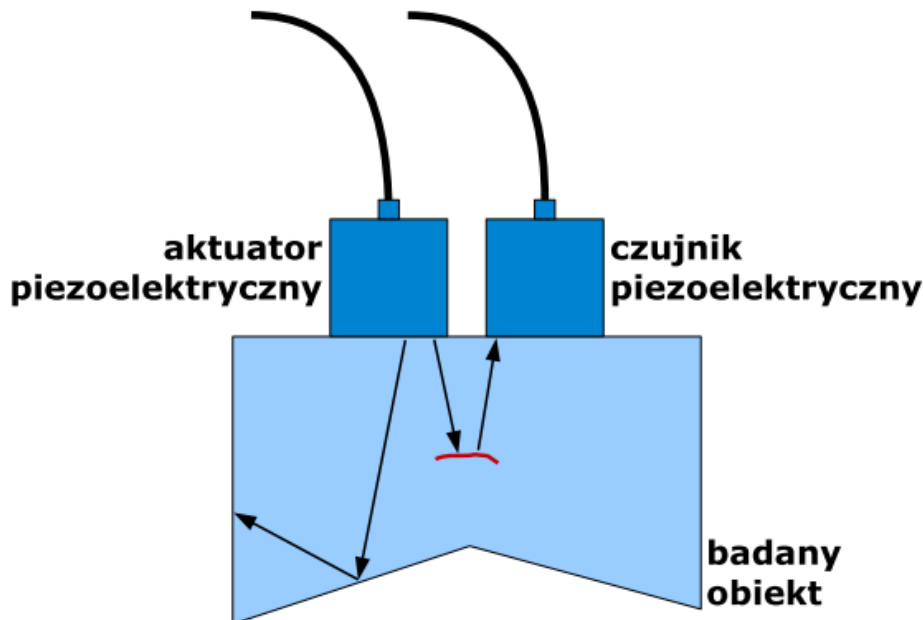
Rysunek 6: Badanie pojedynczym elementem impulsową metodą echa

Przyłożenie piezoelementu nachylonego do powierzchni obiektu za pomocą klina kontaktowego pozwala na wygenerowanie fal podłużnych i poprzecznych, dzięki którym możliwe jest badanie struktur płaskich o dużych powierzchniach oraz rur. Jeśli użyty klin ma konkretne nachylenie, generowane wzbudzenie zostanie załamane w taki sposób, że fala rozejdzie się powierzchniowo, co umożliwi wykrywanie uszkodzeń powierzchniowych. Wysokoczęstotliwościowe fale Lamba są używane do wykrywania uszkodzeń w strukturach warstwowych (laminatach) oraz płaskich.



Rysunek 7: Badanie kątowe falami poprzecznymi lub powierzchniowymi

Istnieją rozwiązania, które angażują w badania więcej niż jeden piezoelement. Takie podejście umożliwia „podział ról” między elementami – jedne z nich generują wzbudzenie, a pozostałe rejestrują odpowiedź badanego obiektu. Tę metodę stosuje się w aplikacjach, gdzie podczas pojedynczego eksperymentu musi być zbadana duża powierzchnia, lub gdy sprawdzany detal ma nieregularne kształty.



Rysunek 8: Badanie dwuprzetwornikowe

Alternatywą dla badania impulsową metodą echa jest badanie skrośne. Polega ono na umiejscowieniu dwóch piezoelementów – generatora i czujnika – na przeciwległych krańcach badanego przedmiotu. Wzbudnik generuje sygnał, który po przejściu przez całą strukturę i „przetworzeniu” przez materiał jest rejestrowany przez czujnik. Rozwiązanie to wymaga swobodnego i bezpiecznego dostępu do badanego przedmiotu w celu przytwierdzenia piezoelementów.

Ostatni podział ultradźwiękowych badań nieniszczących dotyczy algorytmów przetwarzania zebranych danych. Najpopularniejszą metodą jest metoda TOF (ang. time of flight), która polega na pomiarze czasu pomiędzy sygnałem wysłanym (wzbudzeniu) a odebrany, przy znanych gabarytach detalu i ewentualnym rozkładzie piezoelementów. Wszelkie opóźnienia względem referencyjnego pomiaru mogą być traktowane jako potencjalne uszkodzenia. Innym podejściem do analizowania pomiarów jest badanie przesunięć fazowych między sygnałem pomiarowym a sygnałem referencyjnym. Wykryte różnice świadczą o zmianie prędkości fali w ośrodku, co z kolei oznacza istnienie defektu materiału na linii generator-czujnik.

2.3.3. Prezentacja wyników

Po przeprowadzeniu eksperymentu, wyniki badań są przedstawiane na wyświetlaczu. Stosuje się kilka sposobów prezentowania rezultatów badań, z których każdy dopasowany jest do sposobu przeprowadzania testów. Do najczęściej stosowanych prezentacji należą:

- skan A (ang. A-scan) – skan amplitudowy, przedstawiający amplitudę mierzonego sygnału w czasie – od wygenerowania impulsu ultradźwiękowego, przez pomiar odbić od potencjalnych uszkodzeń do pomiaru echa odbitego od przeciwległej krawędzi badanego obiektu,
- skan B (ang. B-scan) – skan prezentujący przekrój powierzchniowy przez badany materiał z zaznaczonymi uszkodzeniami – dwuwymiarowy wykres prezentujący miejsca, od których zostały odbite impulsy (oś rzędnych) przy przesuwającym się wzbudniku (położenie generatora na osi odciętych),
- skan C (ang. C-scan) – prezentacja dwuwymiarowa, w której badania realizowane są przez przesuwanie głowicy nad powierzchnią materiału, a wyniki przedstawiane z tej właśnie perspektywy; stosuje się oznaczenia zero-jedynkowe (w zależności czy moment zmierzenia sygnału powrotnego świadczy o odbiciu od przeciwległej powierzchni detalu czy od bliższego uszkodzenia) lub w skali kolorowej, gdzie barwa oznacza odległość najbliższej bariery dla fali ultradźwiękowej,
- skan S (ang. S-scan) – skan sekcyjny, analogiczny do skanu B, realizowany nie za pomocą ruchu przetwornika, ale z wykorzystaniem dwóch lub więcej piezogeneratorów wyzwalanych z różnymi względnymi opóźnieniami, co pozwala na ukierunkowanie rozchodzenia się czoła fali (wykorzystanie technologii uszeregowania fazowego, ang. phased array).

2.4. Termografia

Ciepło jest jedną z form energii, która jest zdolna do wykonywania pracy. Może się to dokonywać jedną z trzech dróg – przez przewodzenie, konwekcję lub promieniowanie. Miarą stopnia nagrzania ciał jest temperatura, w związku z czym przepływ ciepła możliwy jest tylko między ciałami o różnej temperaturze.

Prawo zachowania energii mówi, że w układzie zamkniętym suma wszystkich rodzajów energii jest stała. Dotyczy to również promieniowania podczerwonego, w związku z czym cała energia cieplna, która dociera do obiektu jest przez niego przepuszczana, odbijana i pochłaniana (czemu czasami towarzyszy zachodzenie reakcji endotermicznych). To, w jakich stosunkach podzieli się ta energia, zależy odpowiednio od współczynników emisyjności, pochłaniania i odbijania. Suma współczynników zawsze wynosi 1.

2.4.1. Przyrządy

Pirometr

Pirometry są narzędziami, które bezstykowo określają temperaturę obiektu poprzez pomiar natężenia promieniowania podczerwonego emitowanego przez dany przedmiot (każdy element, który ma temperaturę wyższą od zera bezwzględnego – 0°K – promieniuje podczerwienią). W zależności od szerokości pasma pomiaru, pirometry dzielą się na szerokopasmowe oraz wąskopasmowe.

Urządzenie pirometru składa się z przyrządu naprowadzającego (wziernik optyczny lub głowica laserowa) polichromator (czujnik natężenia podczerwieni) na badany obiekt oraz korpusu, w którym znajdują się układy elektroniczne odpowiedzialne za przetwarzanie danych pomiarowych. Oprogramowanie może podawać temperaturę chwilową namierzonego obiektu, temperaturę uśrednioną w przedziale czasu i ewentualnie błąd pomiaru z uwzględnieniem zakłóceń pochodzących od tła punktu pomiarowego.

Kamera termowizyjna

Jeśli zamiast punktowego czujnika wyposażyć pirometr w ciepłoczułą matrycę CCD, bardziej rozbudowane algorytmy analizy danych oraz ekran, powstanie kamera termowizyjna. Takie urządzenie służy do szerokokątnego (w porównaniu do pirometru) pomiaru i obrazowego przedstawienia temperatury w wybranym kadrze.

2.4.2. Termograficzne badania nieniszczące

Większość mechanicznych i elektrycznych uszkodzeń urządzeń wiąże się ze wzmożonym i długotrwałym wydzielaniem ciepła przez jeden lub więcej elementów. Dzięki cyklicznemu lub ciągłemu monitorowaniu temperatury w zagrożonych lub podejrzanych miejscach możliwe jest zastosowanie polityki konserwacji prognozowanej (ang. predictive maintenance) i wymianę nadwyrężonych elementów zanim wywołają one poważną usterkę. W powyższy sposób dobrze dobranym sprzętem termowizyjnym można nie tylko monitorować już pracujące urządzenia, ale również wspomagać prace inżynierskie podczas projektowania i testowania prototypów.

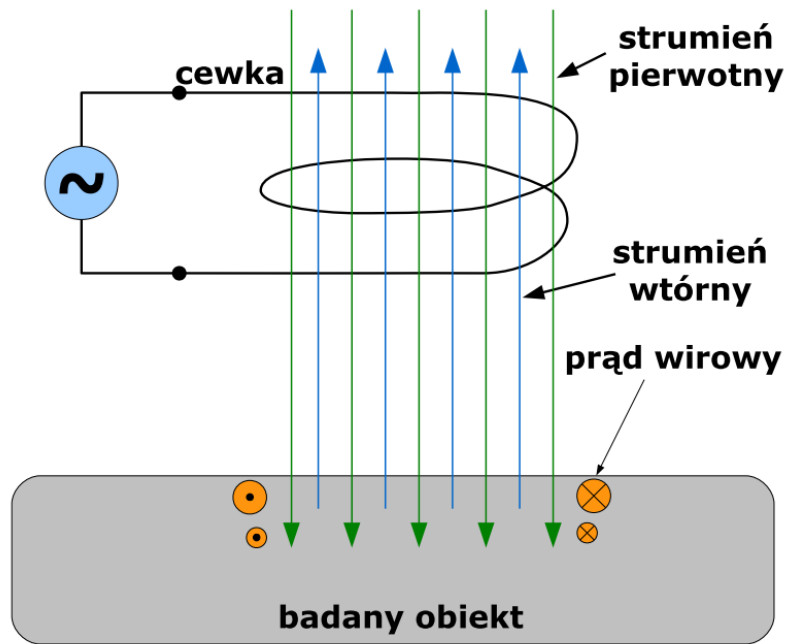
Przeprowadzenie termograficznych badań nieniszczących może odbywać się na pracujących obiektach (np. układach elektronicznych lub mechanicznych) lub w trybie statycznym. Ten drugi sposób polega na wzbudzeniu badanego elementu w sposób ciągły (np. drganiami) lub krótkotrwały (np. impulsem świetlnym) i rejestracji nierównomiernych gradientów temperatury. Taka procedura stosowana jest często podczas badań delaminacji kompozytów w przemyśle lotniczym.

2.5. Badania elektromagnetyczne

Technologie badań nieniszczących wykorzystujących zjawiska elektromagnetyczne obejmują głównie badania prądami wirowymi oraz magnetyczno-proszkowe. Należy pamiętać, że ta grupa badań nieniszczących może być przeprowadzana jedynie na obiektach zbudowanych z materiałów przewodzących prąd elektryczny.

2.5.1. Prądy wirowe

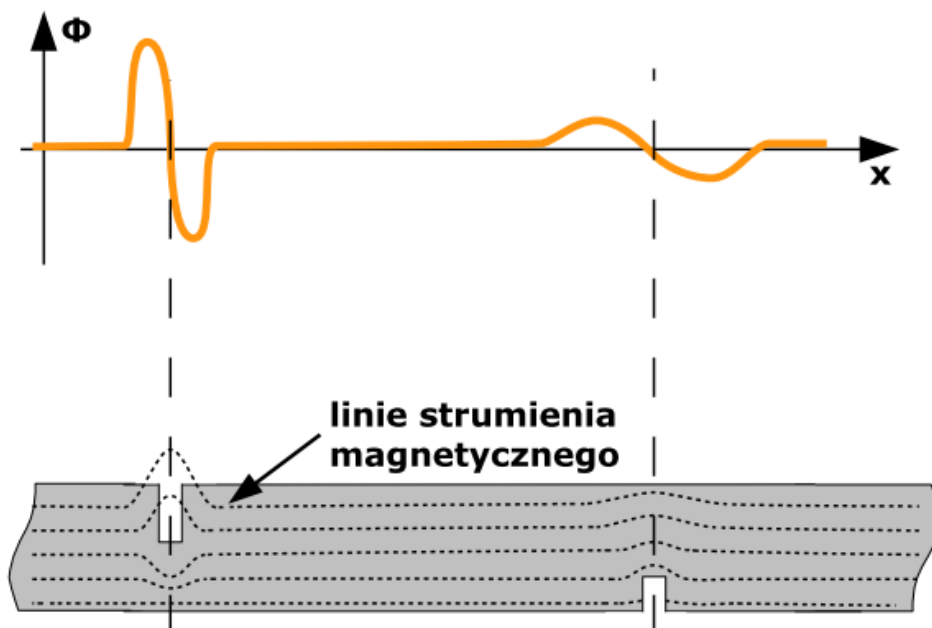
Prąd przemienny płynący przez cewkę wytwarza zmienne pole elektromagnetyczne wewnątrz i wokół niej. Jeśli w ten sposób wzbudzona cewka zostanie przybliżona do przedmiotu zbudowanego z przewodnika, przemienne pole cewki spowoduje pojawienie się indukcyjnych prądów wirowych w detalu, których natężenie jest odwrotnie proporcjonalne do głębokości penetracji. Indukowane prądy wirowe wytwarzają wtórne pole elektromagnetyczne. Pole to ma zwrot przeciwny do pierwotnego, przez co osłabia jego działanie. Te osłabienia są łatwo rejestrowane przez układ sterujący cewką – każde zwiększenie natężenia prądów wirowych powoduje zmniejszenie impedancji cewki.



Rysunek 9: Indukowanie prądów wirowych

2.5.2. Uszkodzenie

Wykrywanie pęknięć w przewodnikach odbywa się według następującej kolejności zjawisk: defekt materiału wydłuża ścieżkę, którą biegnie prąd wirowy, przez co zmniejsza się wtórne pole elektromagnetyczne, co z kolei można zaobserwować rejestrując wzrost impedancji cewki. Jeśli cewka jest przesuwana w stałej odległości od powierzchni przedmiotu ze stałą prędkością, nagła zmiana prądu cewki świadczy o znajdującym się bezpośrednio pod cewką uszkodzeniu badanego obiektu.



Rysunek 10: Wpływ zewnętrznych i wewnętrznych uszkodzeń na strumień magnetyczny

Badania wiroprądowe są badaniami powierzchniowymi i mogą być stosowane zarówno dla obiektów płaskich, jak i struktur „jednowymiarowych” takich jak rury czy profilowanych prętów (tzw. kształtowników). W pierwszym przypadku sonda ma zwartą budowę i badania można przeprowadzać ręcznie lub za pomocą automatu, który będzie przemieszczał sondę z zachowaniem stałej odległości od powierzchni materiału. Jednak częściej niż badania powierzchni płaskich stosuje się badania z wykorzystaniem cewki „nawiniętej” na badany obiekt. W badaniach okrężających często stosuje się dwie cewki – jedna z nich indukuje prądy wirowe w materiale, a druga służy do wykrywania zmian w przewodności i przenikalności magnetycznej materiału, wynikających z jego niejednorodności.

2.5.3. Czynniki mające wpływ na strumień pola magnetycznego

Poprzednia ilustracja przedstawia zachowanie czujnika natężenia strumienia magnetycznego przesuwanego nad górną powierzchnią badanego obiektu na uszkodzenia tego samego rozmiaru, ale znajdującego się po różnych stronach obiektu względem czujnika. Sygnał w przypadku obydwu uszkodzeń ma podobny charakter, ale różni się amplitudą i szerokością. Im bardziej badana struktura zostanie namagnesowana, tym większy wypływ strumienia magnetycznego zostanie wyemitowany przez uszkodzenie. Należy jednak pamiętać, że na zmierzone natężenie mają wpływ różne czynniki:

- kształt defektu – szerokie i płytkie uszkodzenie nie wygeneruje wycieku strumienia z dużą prostopadłą składową (co przenosi się na amplitudę sygnału z czujnika), który byłby widoczny dla wąskiego, ale głębokiego pęknięcia materiału,
- orientacja uszkodzenia – defekty prostopadłe do powierzchni materiału i linii strumienia magnetycznego generują wąski i mocny (łatwo wykrywalny) wyciek strumienia,
- miejsce wady – głębokość penetracji materiału zależy od natężenia i częstotliwości prądu w cewce, w związku z czym najłatwiej wykrywalne uszkodzenia znajdują się blisko powierzchni badanego materiału,
- częstotliwość pracy cewki – im większa częstotliwość, tym mniejsza głębokość penetracji materiału:

$$p = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_s \cdot \sigma \cdot \mu}}$$

gdzie:

p – głębokość penetracji materiału

f_s – częstotliwość pracy cewki

σ – przewodność właściwa materiału

μ – przenikalność magnetyczna materiału

- prędkość poruszania się czujnika/cewki nad powierzchnią badanego obiektu i szybkość reakcji układu pomiarowego – rozdzielczość badań (najmniejsze wykrywalne defekty) zależy od częstotliwości pracy i prędkość poruszania się czujnika:

$$d_{\min} = v \cdot f_s$$

2.5.4. Badania elektromagnetyczne pola dalekiego

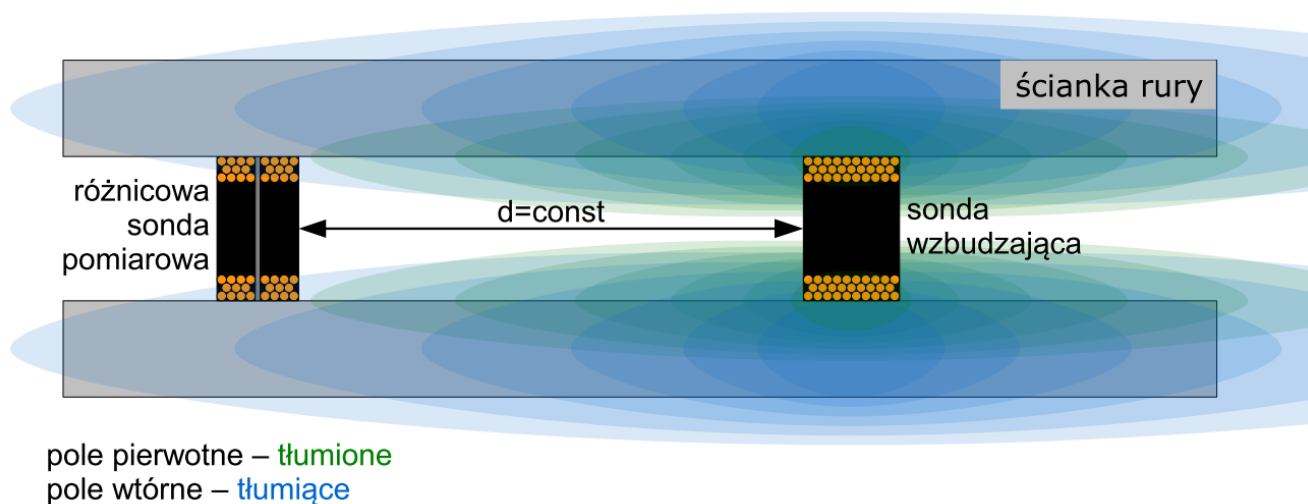
Badania wiroprądowe wymagają odnalezienia kompromisu pomiędzy rozdzielczością pomiarów (im wyższa częstotliwość prądu wzbudzenia tym mniejsze uszkodzenia mogą być wykryte) a głębokością penetracji materiału, która spada wraz ze wzrostem częstotliwości prądu. Problemem, który się pojawia jest wykrywanie tą metodą małych uszkodzeń na większych głębokościach w materiale. Rozwiązaniem jest zastosowanie sprzętu przeznaczonego do badań elektromagnetycznych pola dalekiego.

Badania elektromagnetyczne pola dalekiego wykorzystują zjawisko znoszenia pola pierwotnego przez pole wtórne, dzięki któremu pole wytwarzane przez prądy wirowe (pole wtórne) ma większy „zasięg”. Pozwala to na penetrowanie materiałów na większych głębokościach prądami o dużej częstotliwości i uzyskanie nominalnej rozdzielczości pomiarów dla tego typu badań nieniszczących.

Kluczem badań pola dalekiego jest zachowanie odpowiedniej i stałej odległości między sondą pomiarową a wzbudzającą – pozwala to na ominięcie strefy zazębienia się pola pierwotnego z wtórnym.

Badania elektromagnetyczne pola dalekiego można z powodzeniem stosować do przewodników, jednak w przypadku materiałów nie-ferromagnetycznych uzyskuje się mniejszą czułość niż za pomocą konwencjonalnych badań wiroprądowych.

wtórne pole elektromagnetyczne (prądów wirowych) \gg pierwotne pole elektromagnetyczne (cewki)



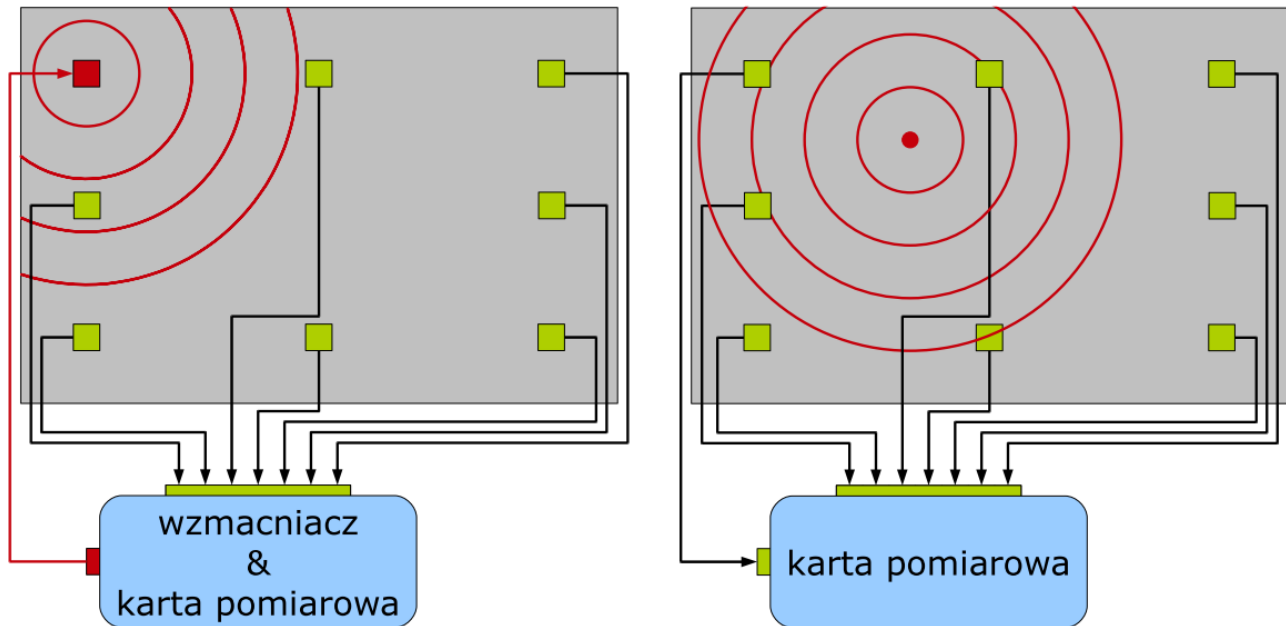
Rysunek 11: Badanie wiroprądowe pola dalekiego

2.6. Metody hybrydowe

Hybrydowe metody badań nieniszczących wykorzystują dwie lub więcej metody, dzięki czemu możliwe jest poszerzenie zastosowań, podniesienie jakości wyników badań czy wyeliminowanie błędów jednej technologii zaletami drugiej. Metody hybrydowe można podzielić na dwie główne grupy, z których jedna „zrzesza” metody wykorzystujące to samo zjawisko fizyczne, natomiast druga działa na zasadzie „dopełniania” się poszczególnych badań.

2.6.1. Wspólne zjawisko

Przykładem metody hybrydowej może być połączenie emisji akustycznej z badaniami ultradźwiękowymi. Dzięki korzystaniu z tych samych zjawisk fizycznych (rozchodzenia się fal mechanicznych w strukturach) i oprzyrządowania (piezoelektrycznych czujników i generatorów drgań, wzmacniaczy sygnałów, kart pomiarowych) możliwe jest ciągle monitorowanie stanu obiektów zarówno w zakresie wykrywania powstających nowych uszkodzeń (EA) jak i monitorowaniu rozwoju już istniejących (UT).



Rysunek 12: Metoda hybrydowa: badania ultradźwiękowe + emisja akustyczna

2.6.2. Dopełnienie

Najszerzym spektrum działań na polu współpracy z innymi metodami mają badania termograficzne. W sytuacji, kiedy obiekt badany jest w trybie aktywnym, czyli podczas eksploatacji w normalnych warunkach, rejestrowane ciepło związane jest z egzotermiczną reakcją wynikającą z pracy detalu. Można jednak stosować wzbudzenie zewnętrzne, które dostarczy energii do badanego obiektu i przekształci się w energię termiczną. Proces taki pozwala na wykrycie także takich uszkodzeń, które niekoniecznie mają bezpośredni wpływ na działanie elementu, ale w perspektywie czasu lub zaistnienia niestandardowego obciążenia mogą spowodować uszkodzenie większego systemu a nawet zagrozić zdrowiu i życiu człowieka. Jako wspomniane wymuszenia stosuje się drgania ultradźwiękowe, prądy wirowe lub promieniowanie (cieplne, świetlne lub mikrofalowe). Podobnie jak w przypadku tradycyjnych badań w zakresie podczerwieni, w centrum zainteresowania hybrydowych badań termograficznych jest nierównomierny gradient temperatur związany z niejednorodnością badanego materiału.

3. Bibliografia

Paul E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing. A Training Guide. Second Edition*, Willey-Interscience, New Jersey 2005.

<http://www.ndt.net> (dostęp: 20 maja 2010)