

**ANALIZA METOD BADAŃ NIENISZCZĄCYCH POD WZGLĘDEM
LOGISTYCZNYM**

**ANALYSIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS IN TERMS
OF LOGISTICS**

Adam SZELEZIŃSKI
a.szelezinski@wm.am.gdynia.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Mechaniczny
Katedra Podstaw Techniki

Tomasz MUCHOWSKI
t.muchowski6@gmail.com

Adam MUC
a.muc@we.am.gdynia.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Elektryczny
Katedra Automatyki Okrętowej

STRESZCZENIE

W pracy przeprowadzono analizę metod badań nieniszczących ze szczególnym wskazaniem na uwarunkowania logistyczne. Zalety badań nieniszczących spowodowały, że są one często uwzględniane w różnych systemach pomiarowych. Jednocześnie popularyzacja badań nieniszczących przyczyniła się do rozwoju nowych metod pomiarowych, a istniejące są nieustannie ulepszane i modernizowane. Każda ze stosowanych metod nieniszczących opiera się na innym zjawisku i wykorzystuje odmienne urządzenia. Artykuł opisuje najczęściej stosowane metody – przedstawia sposób wykonywania pomiarów oraz najczęstsze zastosowania.

SUMMARY

The paper presents an analysis of non-destructive testing methods with particular reference to logistic conditions. The advantages of non-destructive testing have caused that they are often included in various measurement systems. At the same time, the popularization of non-destructive testing has contributed to the development of new measurement methods, and existing ones are constantly improved and modernized. Each of the used non-destructive methods is based on a different phenomenon and uses different devices. The article describes the most commonly used methods - it presents the ways of making measurements and the most common applications.

Słowa kluczowe: NDT, optymalizacja, charakteryzacja, logistyka

Key words: NDT, optimization, characterization, logistics

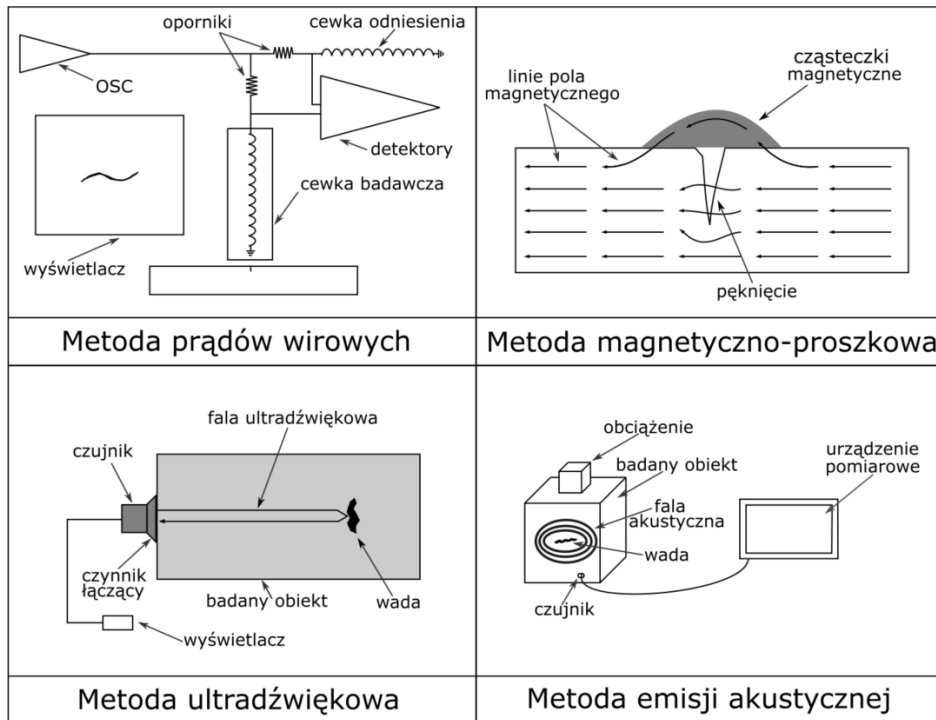
WSTĘP

Mianem NDT (ang. *Non-destructive testing*) określa się badania pomiarowe umożliwiające uzyskanie informacji o badanym obiekcie (m.in. o występujących w nim wadach), w sposób nieniszczący. Oznacza to, że aby metoda badawcza została uznana za NDT, nie może: wpływać negatywnie na funkcjonalność obiektu, permanentnie zmieniać struktury i geometrii obiektu, wpływać na cechy obiektu oraz powodować zmian użytkowych.

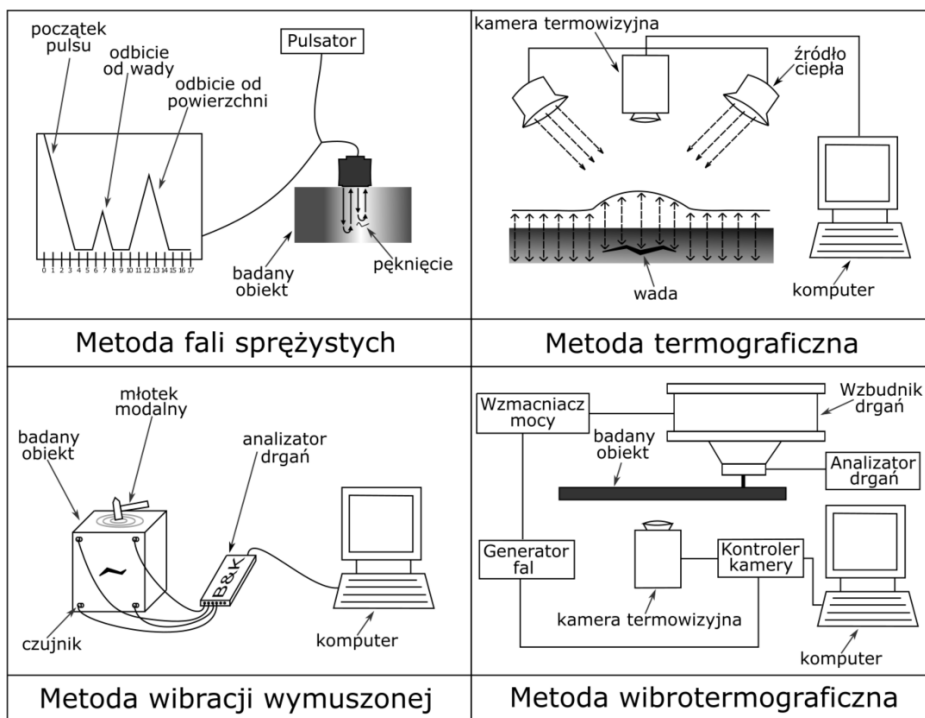
Wykonanie badań NDT wymaga posiadania odpowiedniego sprzętu oraz pracowników o wiedzy, jak takie badania przeprowadzać. W zależności od metody, sprzęt o standardowej funkcjonalności kosztować może od dziesiątek do setek tysięcy. Problemem może też być dostępność specjalistów na rynku pracy. Większość metod NDT jest ograniczona do konkretnego zakresu zastosowań.

Badania NDT stosuje się już od XIX wieku – w tych czasach powstała magnetyczno – proszkowa metoda badań. Stosowano ją w celu wykrywania pęknięć na torach. Na przełomie XIX i XX wieku opracowano też radiograficzną metodę badań. Dr. H. H. Lester jako jeden z pierwszych tworzył przemysłowe radiografy służące do badania konstrukcji metalowych. W XX wieku powstało wiele metod NDT m.in. metoda prądów wirowych, indukcji magnetycznej, cząsteczek magnetycznych, penetracyjna, ultradźwięków, emisji akustycznej oraz inne (rysunek 1). Metody te są do dzisiaj stosowane oraz rozwijane. Przez cały czas powstają nowe metody. Jednymi z najbardziej obiecujących nowoczesnych metod są metody: fali sprężystych, termografia, wibrotermografia, drganiowe oraz wykorzystujące światłowody (rysunek 2).

Poszczególne metody NDT mają swój zakres potwierdzonych zastosowań, w którym najlepiej sprawdzają się i pozwalają na uzyskanie rzetelnych i dokładnych wyników. Oczywiście wraz z rozwojem metod nieniszczących, poszerza się zakres ich zastosowań, można także stosować niektóre metody poza ich domeną. Nie oznacza to jednak, że takie zastosowanie ma sens, biorąc pod uwagę logistykę. Zastosowania często pokrywają się, a wybór metody, w takim wypadku, podyktowany jest stosunkiem kosztu i rzetelności do czasu potrzebnego na wykonanie badania – w artykule określanym jako optymalność badania. Niektóre badania do uzyskania wiarygodnych wyników, wymagają wykonania pomiarów za pomocą więcej niż jednej metody lub skorzystania z metody hybrydowej (metody łączącej dwie lub kilka metod). W takim wypadku również należy wybrać najbardziej optymalne połączenie.



Rys. 1. Ilustracja klasycznych metod NDT
 Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 2. Ilustracja nowoczesnych metod NDT
 Źródło: Opracowanie własne.

Celem tego artykułu jest przekazanie czytelnikowi wiedzy, która pozwoli mu wybrać najbardziej właściwą metodę do docelowego zastosowania, dzięki czemu nie poniesie strat zasobów oraz nie narazi się na koszty związane z zatrudnieniem specjalistów.

1. PRZEDSTAWIENIE SPOSOBU WYKONYWANIA POMIARU I ZASTOSOWAŃ WYBRANYCH METOD

1.1. Metoda magnetyczno – proszkowa

Badanie magnetyczno – proszkowe polega na pokryciu badanej powierzchni proszkiem ferromagnetycznym (metoda sucha) lub zawiesiną proszku w oleju (metoda mokra) i wytworzeniu pola magnetycznego na odcinku badanej wady (np. pęknięcie). Metody magnetyczne wykorzystują zjawisko lokalnego rozproszenia pola magnetycznego lub zmiany przenikalności magnetycznej w miejscu wystąpienia wad. Wady wewnętrzne lub podpowierzchniowe są czynnikiem zmieniającym przebieg linii pola magnetycznego. Zakłócenie pola magnetycznego nazywane jest polem magnetycznym rozproszenia. Wielkość i ukształtowanie pola rozproszenia wynika z charakteru, wielkości, kształtu i orientacji wady względem linii sił wzbudzanego pola magnetycznego. Wady w strukturze spowodują zmiany linii pola magnetycznego - linie pola magnetycznego skupią się wokół wad. Badania magnetyczno proszkowe zaliczane są do tak zwanych metod badań powierzchniowych (Czurchryj, Papkala i Winiowski, 2005; Mizerski, 2005; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015). Badania magnetyczno – proszkowe stosuje się do badania materiałów ferromagnetycznych (przenikalność magnetyczna jest dużo większa od jedności): stali ferrytycznych, żeliwa, staliwa. Za ich pomocą niezawodnie wykrywane są wady powierzchniowe płaskie i wąskoszczelinowe, mogą wskazywać również na duże wady podpowierzchniowe (znajdujące się blisko powierzchni) (Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015).

1.2. Metoda radiograficzna

Badanie metodą radiograficzną polega na naświetlaniu badanego przedmiotu promieniowaniem rentgenowskim X z lamp rentgenowskich lub promieniowaniem gamma γ generowanym ze sztucznych źródeł izotopowych oraz rejestracji na radiogramach cieniowych obszarów wad (Harara, 2008; Rodwell, 2008; FUJIFILM, 2009; Hijazi, 2016). Wykrywanie wad za pomocą badań radiograficznych opiera się na zastosowaniu zdolności przenikania promieniowania przez przedmioty oraz różnicy w osłabieniu natężenia

promieniowania, podczas jego przechodzenia przez badane przedmioty i ich wady. Miejsca wadliwe pochłaniają mniej promieniowania niż materiał jednorodny i są na błonie fotograficznej mniej zaciemnione. Radiogramy przedstawiają dwu wymiarowe cieniowe obrazy trójwymiarowych wad. Obraz wady zawiera jej kształt i wymiary w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Zróznicowanie zaciemnienia radiogramu w obszarze lokalizacji wady i miejscu bez wady obejmuje informacje o wysokości wady w płaszczyźnie równoległej do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Metodą radiograficzną można wykrywać wady o wysokości od około 0,5% grubości elementu w kierunku rozchodzenia się promieniowania i szerokości rozwarcia od 0,1 mm (Czurchryj, Papkała i Winiowski, 2005; Mizerski, 2005; Cicholska i Czechowski, 1999; Lewicka-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015). Badania radiograficzne umożliwiają wykrywanie wewnętrznych, powierzchniowych i podpowierzchniowych wad. Stosując ją można wykrywać wady objętościowe oraz płaskie (można je diagnozować jeżeli kierunek rozchodzenia się promieniowania jest zgodny z kierunkiem ich ułożenia i mają one odpowiednią szerokość i głębokość) (Mizerski, 2005; Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015).

1.3. Metoda ultradźwiękowa

Badania metodą ultradźwiękową polegają na wprowadzeniu do diagnozowanego przedmiotu fal ultradźwiękowych (sprężystych) o częstotliwościach od 20 kHz do 100 MHz z jednoczesnym skanowaniem badanej konstrukcji oraz detekcji sygnałów wytworzonych przez fale przechodzące przez badany przedmiot. Metoda ultradźwiękowa zaliczana jest do tak zwanych metod badań objętościowych. Diagnozowanie i lokalizowanie wad materiałowych w metodzie ultradźwiękowej bazuje na posługiwaniu się trzema metodami: echa, przepuszczania, TOFD (ang. *Time – of – Wight Diffraction*). Najczęściej wykorzystywana jest metoda echa opiera się ona odbiciu fal od powierzchni elementów i od ich wad. W metodzie echa stosuje się głowice pojedyncze, w których jeden przetwornik ultradźwiękowy jest równocześnie źródłem oraz odbiornikiem fal ultradźwiękowych. Metoda przepuszczania (cienia) bazuje na przepuszczaniu wiązki fal przez wady. Podczas realizacji badania metodą przepuszczania wymagany jest dostęp do dwóch powierzchni badanego elementu – dwie głowice umieszcza się naprzeciwko siebie; jedna z nich pełni funkcje nadawczą a druga odbiorczą. Stosując podczas badania metodę przepuszczania

nie ma możliwości lokalizacji wady (ponieważ obserwuje się tylko impuls wywołany przez przejście fal). Metoda TOFD opiera się na wykorzystaniu dyfrakcyjnego ugięcia i rozproszenia fal ultradźwiękowych na przykład na krawędziach poprzecznych, w stosunku do kierunku przebiegu fal, (w aplikacjach techniki TOFD stosowana jest metoda przepuszczania). Podczas przeprowadzenia badania mogą być łączone różne metody badań ultradźwiękowych (Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015). Diagnostować wykorzystując tę metodę można wady wewnętrzne, powierzchniowe i podpowierzchniowe. Pozwala ona na lokalizację wady, ocenę jej wymiarów oraz ocenę rodzaju wady i jej orientacji. Podczas wykonywania badań diagnostycznych omawianą metodą można określić czy wada się rozwija. Umożliwia ona również klasyfikację elementów (zwłaszcza połączeń spawanych), do klasy jakości lub ocenę przydatności elementu do eksploatacji i oszacowanie dalszego możliwego czasu jego pracy. Metodą ultradźwiękową można wykrywać wady objętościowe o następujących wymiarach: szerokość od około 0.001 mm, długość lub średnica od około 0,7 mm oraz wady powierzchniowe o głębokości około 0,1 mm.

1.4. Metoda penetracyjna

Metody penetracyjne są jedną z najstarszych metod badań nieniszczących. Wykorzystuje zjawisko włoskowatości polegające na wnikanii niektórych cieczy (penetrantów o małym napięciu powierzchniowym, odpowiedniej lepkości małej gęstości i zwilżalności powierzchni obiektów) do wąskich naczyń nazywanych kapilarami (Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015). Po wnikięciu penetrantu w szczelinę jego nadmiar usuwa się, a część, która jest w szczelinie wywabiana jest na powierzchnię za pomocą wywoływacza. Wchłania on penetrant, który wnikał i pozostał w nieciągłościach, dzięki czemu pojawia się łatwo widoczne powiększone wskazanie nieciągłości (Czurchryj, Papkala i Winiowski, 2005; Mizerski, 2005). Przed rozpoczęciem badania należy badałą powierzchnię oczyścić i wysuszyć.

Oględziny wskazań wyników badania przeprowadzanego metodą penetracyjną powinny odbywać się w świetle białym, którego natężenie powinno wynosić minimum 500 luksów lub ultrafioletowym o długości 365 nm. Badania penetracyjne umożliwiają kontrolę elementów o temperaturze od -30 do $+100^{\circ}\text{C}$ (Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski,

1991; Krajewski i Hudycz, 2015). Szerokość realizacji diagnozowanej powierzchni powinna obejmować spoinę i minimum 10 mm po jej obydwu spoinach. Badania penetracyjne służą do wykrywania wad wychodzących na powierzchnię: otwartych wad powierzchniowych, płaskich, wąskoszczelinowych: pęknięć oraz innych wad powierzchniowych (np. przyklejanie powierzchniowe), wad przelotowych (nieszczelności), braku przetopu, niemetalicznych wtrąceń powierzchniowych, zawałcowań, zakłuc, fałd, porów i porowatości z ograniczeniami wżerów korozyjnych i erozyjnych. Stosując opisywaną metodę możliwe jest wykrywanie różnie zorientowanych wad powierzchniowych otwartych tzn. niezaciągniętych i niewypełnionych zanieczyszczeniami. Przy pomocy metody penetracyjnej możliwe jest lokalizowanie wad znajdujących się w miejscach nagłych zmian przekroju badanych elementów (wykrywanie tak położonych wad jest niemożliwe lub bardzo trudne innymi metodami NDT) (Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015).

Metodę penetracyjną można wykrywać wady szczelinowe o szerokości minimalnej od około 0,00025 mm do około 0,2 mm. Nie można tą metodą określić ściśle głębokości wady. Nie ma możliwości wykrywania wad pod warstwą pokrycia na przykład malarskiego lub galwanicznego (Cicholska, 1999; Lewińska-Romicka, 2001; PN-EN 571-1:1999).

1.5. Metoda emisji akustycznej

Badania za pomocą emisji akustycznej polegają na pomiarach dźwięków generowanych przez materiał. Zjawisku emisji akustycznej towarzyszy intensywne uwalnianie energii, która rozchodzi się po strukturze badanego obiektu we wszystkich kierunkach. Amplituda drgań maleje wraz z upływem czasu i wzrostem odległości od centrum, a zasięg drgań zależy od własności materiału, kształtu badanego obiektu i otoczenia (Pollock, 2007; Keshtgar i Modarres, 2013; Svoboda i Zemlicka, 2012). Badanie metodą emisji akustycznej można stosować jako metodę oceny stanu konstrukcji w próbach odbiorczych oraz jako metodę monitorowania konstrukcji (SHM) w warunkach jej powstania jak i w eksploatacji (EC System sp. z.o.o, 2012; Malecki i Ranachowski, 1994; Krajewski i Hudycz, 2015; Auld, 1990). Dzięki zastosowaniu wielu czujników odbierających i rejestrujących zmiany natężenia dźwięku można dokonać identyfikacji i lokalizacji uszkodzenia. Zasady realizacji badań tą metodą zamieszczone są w normie PN-EN 13554.

Emisja akustyczna jest w ostatnim dwudziestoleciu bardzo ważnym uzupełnieniem badań radiograficznych i ultradźwiękowych, za jej pomocą można otrzymać unikalne informacje o procesach przebudowy mikrostruktury materiału (ruchy dyslokacyjne, powstanie

mikropęknięć). Metoda emisji akustycznej jest coraz częściej wykorzystywana do przeprowadzania badań nieniszczących połączeń spawanych i diagnozowania powstających w nich pęknięć. W porównaniu z innymi metodami badań nieniszczących emisja akustyczna ma tę zaletę, że może być wykorzystywana nie tylko do diagnostyki już gotowego elementu spawanego, lecz również do monitorowania jakości procesu spawania jeszcze podczas jego przebiegu (Malecki i Ranachowski, 1994). Emisja akustyczna pozwala wykrywać uszkodzenia, które powstają lub powiększają się w trakcie trwania badania. Stosowana częstotliwość pomiarów metodą emisji akustycznej jest znaczna i zawiera się od około 20 kHz do 2 MHz. Fale są rejestrowane za pomocą czujników piezoelektrycznych odpowiednio rozmieszczonych na diagnozowanym obiekcie. Sprzęt wykorzystywany w metodzie emisji akustycznej powinien spełniać wymagania określone w normie PN- EN 13477-2.

1.6. Metoda prądów wirowych

Badanie prądami wirowymi jest jedną z kilku metod nieniszczących, które w głównym założeniu polegają na elektromagnetyzmie jako podstawie do wykonywania badań. Prąd wirowy jest tworzony poprzez indukcję elektromagnetyczną. Prądy wirowe są indukcyjnymi prądami elektrycznymi, które krążą okrężną ścieżką. W przypadku zderzenia się prądu wirowego z wadą, nastąpi zmiana impedancji głowicy, co skutkuje otrzymaniem odpowiedniego odczytu na defektoskopie wiroprądowym. Dzięki temu, obserwując to zaburzenie jesteśmy w stanie wykryć wadę. Wady, które umożliwia diagnozować tą metodą badań to najbardziej niebezpieczne nieciągłości tj. powierzchniowe nieciągłości płaskie, wąskoszczelinowe, a także relatywnie duże, położone blisko powierzchni nieciągłości podpowierzchniowe. W praktycznym zastosowaniu będą to nieciągłości wychodzące na powierzchnię obiektów (półwyrobów i wyrobów gotowych), nieciągłości znajdujące się pod warstwą pokrycia malarskiego lub galwanicznego oraz nieciągłości znajdujące się w poszczególnych warstwach obiektów wielowarstwowych. Defektoskopię można przeprowadzać zarówno na powierzchniach gładkich jak i surowych, zarówno w temperaturze pokojowej jak i w temperaturze podwyższonej nawet do 1200° C. Metodę prądów wirowych można stosować w materiałach dobrze przewodzących prąd jak i słabych przewodników. Przykładami materiałów podlegających detekcji są: stale ferrytyczne, stale austenityczne, miedź, stopy miedzi, aluminium, stopy aluminium, tytan, stopy tytanu, inconel 600, hastelloy, stop Monella, cyrkon, wolfram, molibden oraz materiały kompozytowe np. wzmocnione

włóknem węglowym (Lewińska-Romicka, 2001; Lutenco, Uchanin, Mishchenko i Opanasenko, 2012; Zergoug, Lebaila i Kamel, 2005; Alencar, Silva, Vieira i Soares, 2009).

1.7. Metoda wibrometru laserowego

W wibrometrii laserowej, jak wskazuje na to nazwa do przeprowadzania pomiarów korzysta się z wiązki laserowej, co pozwala na bezkontaktowe, nie inwazyjne, zdalne pomiary wibracji. Główną zasadą działania wibrometru laserowego, jest to, że częstotliwość wibracyjna powierzchni może zostać zmierzona poprzez analizę odbitej od badanej powierzchni wiązki laserowej. W zależności od pożądanego zakresu częstotliwości pomiarowej, rozdzielczości i czułości, skomplikowanie systemu pomiarowego może wahać się od bardzo prostego, małego urządzenia z kilkoma komponentami do wyrafinowanego systemu będącego w stanie rozróżnić zmiany minut w częstotliwości wibracyjnej. Dwoma głównymi zjawiskami fizycznymi, które pozwoliły wykrywać drgania o wysokich częstotliwościach, z dużą dokładnością (czułością), są interferencja i efekt Dopplera. Głównymi zaletami wibrometrów laserowych jest możliwość dokonania bezdotykowych i bezinwazyjnych pomiarów. Dzięki temu w żaden sposób nie oddziałują na badany układ. Optyczny charakter wibrometrów czyni je odpornymi na zakłócenia zewnętrzne tj. zaburzenia elektromagnetyczne. Na rynku dostępne jest zaawansowane oprogramowanie, które czyni analizy szybkimi i w miarę łatwymi do wykonania. Wadą wibrometrów jest konieczność odizolowania ich od wibracji środowiskowych np. stosując gumę jako tłumik. Kolejną wadą jest wysoka cena (Malahs, 2015).

1.8. Metoda fali sprężystych

Wiele różnych technik wykorzystujących metodę propagacji fal sprężystych używanych jest do detekcji, lokalizacji oraz identyfikacji uszkodzeń występujących w elementach konstrukcji. Operator korzysta w badaniach z sieci przetworników piezoelektrycznych umieszczonych na badanym obiekcie do generowania oraz rejestrowania fal sprężystych w celu lokalizacji pęknięcia. Zarejestrowane sygnały są przetwarzane za pomocą transformaty falkowej. Metoda propagacji fal sprężystych wykorzystuje fakt, że nieciągłości występujące w badanym elemencie powodują zaburzenia i odbicia w propagacji fal. Wspomniane zaburzenia mogą zostać zarejestrowane za pośrednictwem sieci przetworników piezoelektrycznych. Zarejestrowane sygnały podlegają filtracji i obróbce, której zadaniem jest detekcja, lokalizacja oraz identyfikacja rodzaju uszkodzenia. Najczęściej spotykane w literaturze metody detekcji uszkodzeń wykorzystują w swych algorytmach rejestrowane sygnały propagujących fal powierzchniowych: Lambda (Fong, 2005).

Zaletami badań metodą fali sprężystych są: możliwość badań miejsc trudno dostępnych dla standardowych technik badań nieniszczących możliwość badania obiektu w jego normalnych warunkach pracy (zwłaszcza pod obciążeniem), możliwość wykrywania i badania powiększających się defektów. Wadami badań metodą fali sprężystych są: możliwość analizy pomiarów tylko z pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania przez doświadczonego operatora, bardzo kosztowny sprzęt pomiarowy, czułość systemów badań na szумы i wpływ środowiska zewnętrznego (Krause, Dackermann i Jianchun, 2015).

1.9. Metoda termograficzna

Praca wszystkich urządzeń mechanicznych związana jest z wydzielaniem ciepła. Termograficzne metody badań polegają na bezkontaktowej detekcji, przetworzeniu i wizualizacji rozkładu widma promieniowania elektromagnetycznego, w zakresie podczerwieni, pochodzącego z powierzchni badanego elementu (Rudowski, 1978; Krajewski i Hudycz, 2015). Przy pomocy tej metody można monitorować urządzenia w trakcie ich eksploatacji oraz wspomagać prace projektowe i testowe nowo powstających urządzeń (Lewińska-Romicka, 2001; Biernacki, Jawor, Kozak, Lipnicki, Marchwicki, Niezborala, Puchaczewski i Świątkowski, 1991; Krajewski i Hudycz, 2015). Termograficzne badania można przeprowadzać na pracujących maszynach lub w tak zwanym trybie statycznym (polega on na wzbudzaniu badanego elementu w sposób ciągły np. drganiami lub krótkotrwałym impulsem świetlnym i rejestracji nierównomiernych gradientów temperatury). Metoda termografii pozwala na pomiar lub mapowanie temperatur powierzchni podczas przenoszenia się ciepła z, przez lub do obiektu. Najprostsze badanie termograficzne to punktowy pomiar termoelementem. Pomiar tego typu może przydać się w lokalizacji gorących punktów, takich jak zużywające się łożysko, zaczynające się nagrzewać w wyniku wzrostu tarcia. Bardziej zaawansowane techniki termografii wykorzystują kamery termowizyjne, rejestrujące obszary o nierównym rozkładzie temperatur lub tzw. gorące punkty. W niektórych badaniach, może być konieczne generowanie przepływu ciepła przez obiekt lub ocenianie przepływu ciepła w funkcji czasu.

Termografia stosowana jest w diagnostyce maszyn (np. badania tarciovych zjawisk cieplnych występujących w maszynie) ale również w budownictwie (lokalizacji wad izolacji cieplnej budynków, określenia jakości materiałów użytych do budowy), w medycynie (wykrywanie i lokalizacja stanów zapalnych np. reumatycznych, badania układu krążenia), w hutnictwie (badanie jakości odlewów, określanie stanu izolacji termicznej pieców i kadzi, określanie rozkładu temperatur w piecach i na ich powierzchni, określanie rozkładu

temperatur podczas walcowania), elektronice (badanie jakości układów scalonych, poszukiwanie uszkodzonych elementów w urządzeniach elektronicznych), energetyce (termowizyjna kontrola transformatorów, linii najwyższych napięć, rozdzielnic, określanie stanu izolacji termicznej) badaniach środowiska (np. badanie wysadów solnych, wieloletniej zmarzliny), badaniach dzieł sztuki i innych przedmiotów dziedzictwa kulturowego (wykrywanie obrazów znajdujących się pod innymi obrazami, określanie stan konserwacji i autentyczności obrazów) (Dudzik, 2013; Rudowski, 1978; Więcek, Perkowski i Wysocki, 2010; Klewski, Sanacki i Socha, 2004; Krajewski i Hudycz, 2015). Wibrotermografia pozwala na skuteczniejsze wykrywanie pęknięć. Próbka ciała stałego zostaje wzbudzona dużą dawką energii akustycznej o niskiej częstotliwości. Powoduje to grzanie brzegów pęknięcia, co może być zarejestrowane za pomocą kamery podczerwonej. Badania termograficzne mogą również znaleźć zastosowanie w analizie procesów spawania i zgrzewania, gdzie ważne są informacje dotyczące rozkładu temperatury w poszczególnych strefach złącza.

1.10. Metoda wibrotermograficzna

Wibrotermografia należy do metod aktywnych, związanych z zewnętrznym wymuszeniem badanego obiektu. W tej metodzie wykorzystywane jest zjawisko, które polega na wzroście temperatury w strukturze, w miejscach wystąpienia defektów strukturalnych spowodowanych rozchodzeniem się fal elastycznych w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych. W miejscu występowania defektu strukturalnego występuje zwiększona podatność mechaniczna stąd więcej energii traci się w postaci ciepła. Ciepło powstałe w miejscu wystąpienia defektów strukturalnych propaguje na powierzchnie obiektu gdzie może zostać zmierzone przez kamerę termowizyjną. Interpretacja obrazów otrzymanych przy pomiarze termowizyjnym pozwala na identyfikację defektów strukturalnych. W aktywnej wibrotermografii stosuje się wymuszenie falami ultradźwiękowymi (o częstotliwościach do 25 kHz) lub wymuszeniem wibracyjnym. Wymuszenie może mieć charakter powtarzalnych impulsów lub ciągłych sygnałów harmonicznym. Następnym elementem procesu diagnostycznego opierającego się na aktywnej termografii jest porównanie wzorcowych obrazów termowizyjnych (zarejestrowanych na nieuszkodzonym obiekcie) z obrazami pochodzącymi z rejestracji aktualnego stanu diagnozowanego obiektu. Zarejestrowany sygnał zostaje poddany transformacji Fouriera, otrzymując w ten sposób powierzchniowe rozkłady amplitudy i fazy. Faza, jako funkcja czasu propagacji fali od wady do powierzchni, pozwala na ustalenie głębokości wady (Wysocka-Fotek, 2011).

Dużą zaletą wibrotermografii jest prostota jej stosowania oraz szybki czas realizacji badania diagnostycznego w porównaniu z innymi metodami badań nieniszczących. Można ją stosować jako metodę laboratoryjną oraz na obiekcie przemysłowym bez konieczności demontażu badanych elementów. Wadą wibrotermografii jest duża czułość związana ze zmianami emisyjności badanej powierzchni, która to zależy od stanu powierzchni oraz jej koloru (zalecane jest pokrycie jej warstwą farby lub sadzy tak aby powierzchnia była czarna i matowa). Przy badaniu obiektów o dużej masie i objętości wymagana jest duża moc źródła ultradźwięków do uzyskania efektu zmiany temperatury na badanej powierzchni (EC System sp. z o.o, 2012; Uhl, 2015).

1.11. Metoda wibracji wymuszonej

Pierwszym elementem badań drganiowych jest wzbudzenie badanego obiektu. Wymuszenie może mieć postać impulsu (np. przez uderzenie) lub może mieć charakter harmoniczny. Wzbudzony element drga w charakterystyczny dla niego sposób, a drgania te są rejestrowane. Następnym elementem badań drganiowych jest przetworzenie pomierzonych danych (najczęściej transformacja z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości za pomocą transformaty Fouriera). Kończącym elementem badań drganiowych jest porównanie otrzymanego widma z widmem wzorcowym (Fritzen, 2014). Ocena badanego elementu za pomocą badań drganiowych może się odbywać 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 (Ross, Geske, Larson i Murphy, 1991).

W badaniach metodami drganiowymi używane są najczęściej trzy główne typy czujników: czujniki przemieszczenia, czujniki pomiaru prędkości drgań oraz akcelerometry. Czujniki przemieszczenia mogą bazować na zjawisku prądów wirowych, do wykrycia pionowych i/lub poziomych ruchów (w zależności czy rozmieszczone są dwa czy jeden czujnik) badanego obiektu. Podstawowe czujniki prędkości korzystają z magnesu sprężynowego, który porusza się po cewce, przy przymocowanej zewnętrznej obudowie czujnika do monitorowanego obiektu. Cewka porusza się przez pole magnetyczne, wytwarzając sygnał elektryczny, który zostaje wysłany do odbiornika i rejestrowany do analizy. Nowsze modele czujników drganiowych korzystają z technologii "czasu lotu". Podstawowe akcelerometry korzystają z piezoelektrycznego kryształu (który konwertuje fale sprężyste do elektrycznych impulsów) przymocowanego do masy, która drga (z powodu

na ruch obiektu do którego przymocowana jest obudowa czujnika). Jeżeli masa i kryształ drgają, wytwarzane jest niskie napięcie, które przechodzi przez przedwzmacniacz i wysłane jest do urządzenia rejestrującego (asnt.org, 2011).

Metoda badań wibracyjnych jest powszechnie stosowana w konserwacji zapobiegawczej pomp, silników, skrzyń biegów, turbin, wiatraków i kompresorów, ale także wszystkich rodzajów pojazdów mechanicznych, ciężkiej maszynierii, mostów i konstrukcji inżynierskich. Najczęściej badanymi obiektami są samoloty, urządzenia mechaniczne, mosty, budynki, płytki obwodów, komputery, instrumenty, urządzenia rotujące, statki kosmiczne, satelity oraz pojazdy. Nadmierna wibracja sprzętu pod obciążeniem może być spowodowana zużyciem, korozją lub nawet czynnikami środowiskowymi. Nadmierna wibracja jest najczęstszym powodem uszkodzenia sprzętu i struktur. W wielu przypadkach nadmierna wibracja wywołuje duży hałas (Sim, Chau i Toh, 1995; Aguilar, Ramirez, Haach i Pando, 2016; Huynh i Tran, 2004). Na podstawie badań wibracyjnych można ustalić czy obiekt nadaje się do dalszego bezpiecznego użytku.

1.12. Metoda oparta na czujnikach światłowodowych

Światłowodowa (fibre optic) metoda badań polega na wykorzystaniu przewodu światłowodowego, jako czujnika do oceny stanu technicznego badanego obiektu. Najczęściej na bazie światłowodów budowane są czujniki do pomiarów przemieszczeń-odkształceń oraz temperatur. Światłowód jest odporny na zakłócenia elektromagnetyczne i korozję, co oznacza, że można go umieszczać bardzo ekstremalnym środowisku. Światłowód jest mały, lekki i może być zarówno osadzony na strukturze jak i wewnątrz, nie mając większego wpływu na strukturę. Czujniki światłowodowe mogą zostać zaprojektowane tak by mierzyć czy też wykrywać bardzo wiele zjawisk fizycznych. Przykładem może być stopień wypełnienia płynem, ciśnienie, pole elektryczne, naprężenia, wibracyjne i temperatura. Jest wiele różnych rodzajów czujników, wliczając czujniki Bragga (FBG), IFPI i EFPI (Ansari, 1997). Jeśli wartościami fizycznym do zmierzenia są naprężenia, temperatury, ciśnienia, itp. światłowód sam w sobie (bez ingerencji w jego strukturę) może być czujnikiem. W takich przypadkach fizyczne wartości do zmierzenia mogą wywołać zmianę natężenia, fazy, polaryzacji, długości fali, czasu tranzytowego (czasu przejścia) światła w światłowodzie. Zmiana natężenia światła jest najpowszechniej stosowaną w praktyce metodą. Główną zaletą światłowodowych systemów monitoringu jest fakt, że elementem pomiarowym może być dowolny fragment światłowodu. Dzięki właściwościom światłowodu, takim jak niewielka średnica przekroju włókna oraz elastyczność, może on zostać

dopasowany praktycznie do dowolnego kształtu elementu konstrukcji. Ponadto duża odporność na działanie warunków termicznych oraz innych czynników zewnętrznych powoduje, że systemy monitoringu bazujące na światłowodach cechują dużą niezawodność oraz wiarygodność pozyskanych danych. Światłowodowe systemy monitoringu cechuje także to, że sensory zapewniają galwaniczną izolację, odporność na EMI (electro-magnetic-interference – zakłócenia elektromagnetyczne), szum elektryczny oraz interferencje, wewnętrzne bezpieczeństwo, brak wymagań w zasilaniu, możliwość operowania zdalnego, mały rozmiar i małą wagę, wbudowaną telemetrię (światłowód sam w sobie jest łączem danych), szerokie pasmo, wysoką czułość, sygnał odporny na zakłócenia amplitudowe wywołane fluktuacją natężenia źródła światła zasilającego, duża czułość przetwarzania, nieelektryczny sygnał wyjściowy (Murawski, 2015).

Najbardziej sukcesywnym polem, w którym wykorzystuje się metodę światłowodową jako NDT jest kosmonautyka, inżynieria lotnicza oraz lądowa (głównie budowa mostów), w której stosuje się ją od ponad 20 lat (Ansari, 1997; Lin, Lai, Chang i Li, 2006; Tennyson, Mufti, Rizkalla, Tadros i Benmokrane, 2001; Lin, Pan, Kuo i Chang, 2005). Zazwyczaj przewód światłowodowy jest umieszczony w strukturze betonowej, naprężenie i temperatura tych struktur moduluje natężenie światła, długość fali, fazę, polaryzację, itd. przechodzącą przez światłowód i podczas analizy tych wartości optycznych, właściwości struktury takie jak przeciążenie i wady spowodowane korozją mogą zostać zmierzone. W czasach obecnych, spora ilość mostów ma w sobie wbudowane czujniki światłowodowe np. most Tsing MA w Hong Kongu (Chan, Yu, Tam, Ni, Liu, Chung i Cheng, 2006). Bardzo obiecujący obszar badań to monitoring materiałów kompozytowych z zastosowaniem metody światłowodowej. W tym przypadku światłowód może być umieszczony w środku struktury materiału na etapie produkcji. Monitoring konstrukcji przy wykorzystaniu światłowodu może osiągać rozdzielczość 1 mikro-epsilona, przy badaniu jej odkształceń (Tay, Wilson i Wood, 1990).

2. PODSUMOWANIE

Metody NDT pozwalają na nieniszczące wykonywanie pomiarów na obiektach i zjawiskach. Umożliwia to wykrywanie wad i defektów konstrukcji. Obszar zastosowań poszczególnych metod często się pokrywa – konkretny obiekt można sukcesywnie zbadać za pomocą kilku metod. W takim przypadku warto wybrać metodę najbardziej optymalną, by zredukować koszty.

Wybór odpowiedniej metody zależy jest od charakterystyki obiektu poddanego badaniom. Jeśli badane jest urządzenie mechaniczne tj. silniki, turbiny, pompy itp.,

to stosować powinno się metody oparte na analizie drgań, ponieważ wady występujące w tego typu obiektach bardzo często objawiają się w generowaniu przez obiekt zwiększonych wibracji. Odpowiednimi metodami badawczymi są: metoda wibracji wymuszonej i metoda wykorzystująca wibrometr laserowy.

Jeśli badany jest materiał kompozytowy pod względem wad tj. pęknięcia, nieciągłości, rozwarstwienia, stosować można większość metod wymienionych w artykule. W zależności od rodzaju materiału wykorzystuje się inne metody. Materiał ferromagnetyczny bada się metodą magnetyczno – proszkową oraz metodą prądów wirowych. Badania metodą magnetyczno – proszkową są tańsze w realizacji, lecz metoda prądów wirowych może zostać przeprowadzona zarówno na powierzchniach gładkich jak i surowych oraz w temperaturze sięgającej nawet 1200 °C. W przypadku pozostałych materiałów bardzo popularna jest metoda ultradźwiękowa – pozwala wykrywać wady wewnętrzne, powierzchniowe i podpowierzchniowe. Dzięki niej można ustalić lokalizację, wymiary i orientację wady oraz dokonać charakteryzacji. Alternatywami są metoda radiograficzna, penetracyjna, fali sprężystych oraz metoda oparta na czujnikach światłowodowych. Metoda radiograficzna pozwala wykrywać wady powierzchniowe i podpowierzchniowe – objętościowe i płaskie. Cechują ją jednak wady tj. brak wykrywalności płaskich wad równoległych do powierzchni, ograniczenia wynikające z występowania promieniowania jonizującego oraz duże gabaryty i ciężar aparatów rentgenowskich. Metodę penetracyjną cechuje możliwość wykrycia wad w miejscach nagłych zmian przekroju badanego elementu – inne metody nie zawsze są w stanie wykryć takie wady. Metoda fali sprężystych świetnie sprawdza się w badaniu obiektów w normalnych warunkach pracy. Metoda ta wymaga jedynie dostępu z jednej strony (inne metody wymagają zazwyczaj dostępu co najmniej z dwóch), przez co może zostać zastosowana w badaniach obiektów w miejscach trudnodostępnych. Jeśli obiekt jest częścią konstrukcji, nie jest wymagany jego demontaż. Metoda oparta na czujnikach światłowodowych cechuje się dużą odpornością na warunki środowiskowe tj. wysoka temperatura, zakłócenia elektromagnetyczne, szum elektryczny, warunki atmosferyczne. Światłowód można dopasować do praktycznie dowolnego kształtu elementu konstrukcji, może on również zostać wbudowany w konstrukcję podczas jej produkcji. Dzięki tym cechom znajduje zastosowania w monitoringu konstrukcji przeznaczonych do ekstremalnej eksploatacji np. konstrukcje kosmiczne, okręty, mosty.

W konstrukcjach spawanych pomiarów dokonuje się metodą emisji akustycznej. Można w ten sposób wykryć wady spawalnicze oraz je sklasyfikować. Alternatywę stanowi

może metoda wibracji wymuszonej – trwają badania nad możliwością stosowania jej do wykrywania wad spawalniczych.

Jeśli badany obiekt posiada wady o właściwości cieplnej np. kotły, piece odpowiednimi metodami są termografia oraz wibrotermografia. Metody te znajdują także zastosowanie podczas badania układów elektronicznych i instalacji elektrycznych – uszkodzone elementy generują większą temperaturę.

LITERATURA

- Aguilar, R. Ramirez, E. Haach, V. G. Pando, M. A. (2016). *Vibration-based nondestructive testing as a practical tool for rapid concrete quality control*. Construction and Building Materials, Tom 104, 181-190.
- Alencar, D. A. Silva, S. F. Vieira, A. L. P. S. Soares, A. (2009). *Eddy Current NDT: A Suitable Tool to Measure Oxide Layer Thickness in PWR Fuel Rods*. Referat wygłoszony na konferencji: 2009 International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2009. Rio de Janeiro.
- Ansari, F. (1997). *State-of-the-art in the applications of fibre-optic sensors of cementitious composites*. Cement and Concrete Composites, Tom 19, 3-19.
- Auld, B.A. (1990). *Acoustic Fields and Waves in Solids, Vol I & II*, 2nd edition USA: Krieger Publishing Company.
- Biernacki, B. Jawor, R. Kozak, T. Lipnicki, M. Marchwicki, M. Niezborala, J. Puchaczewski, N. Świątkowski, R. (1991). *Badania metodami nieniszczącymi*. Gdańsk: Laboratorium Badań Nieniszczących KOLI.
- Chan, T. H. T. Yu, L. Tam, H. Y. Ni, Y. Q. Liu, S. Y. Chung, W. H. Cheng, L. K. (2006). *Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation*. Engineering Structures, Tom 25 Numer 5, 648-659.
- Cicholska, M. Czechowski, M. (1999). *Materialoznawstwo okrętowe*. Gdynia: Dział Wydawniczy Wyższej Szkoły Morskiej.
- Czurchryj, J. Papkala, H. Winiowski, A. (2005). *Niezgodności w złączach spajanych*. Gliwice: Instytut Spawalnictwa.
- Dudzik, S. (2013). *Wyznaczenie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej i sztucznych sieci neuronowych*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- EC System sp. z o.o. (2012). *Badania nieniszczące w nowoczesnym wydaniu*. Kraków: EC System sp. z o.o.
- Fritzen, C. (2014). *Vibration-Based Methods for SHM*. Germany: NATO.
- FUJIFILM. (2009). *FUJIFILM Technical Handbook: The Fundamentals of Industrial Radiography*. USA: Fujifilm.
- Fong, K. L. J. (2005). *A study of curvature effects on guided elastic waves*. Londyn: Imperial Collage.

- Harara, W. (2008). *Digital Radiography in Industry*. Referat wygłoszony na: 17th World Conference on Nondestructive Testing. Szanghaj.
- Hijazi, A. (2016). Introduction to Non-Destructive Testing Techniques (Radiographic Testing). <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT> (2011).
- Huynh, D. Tran, D. (2004). *A Non-Destructive Crack Detection Technique Using Vibration Tests*. Referat wygłoszony na: Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04). Footscray.
- Keshtgar, A. Modarres, M. (2013). Detecting Crack Initiation Based on Acoustic Emission. AIDIC, Tom 33, 547-552.
- Klewski, A. Sanacki, J. Socha, P. (2004) *Nowe rozwiązania techniki termalnej zastosowane do diagnostyki urządzeń*. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, EXPO – SHIP 2004, 323-332.
- Krajewski, A. Hudycz, M. (2015). *Zapewnienie jakości i kontrola złączy spajanych*. Warszawa: Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Krause, M. Dackermann, U. Jianchun, L. (2014). *Elastic wave modes for the assessment of structural timber: Ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Lewińska – Romicka, A. (2001). *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo – Techniczne.
- Lin, Y. B. Lai, J. S. Chang, K. C. Li, L. S. (2006). *Flood scour monitoring system using fibrebragg grating sensors*. Smarter Mater. Struct, Tom 15 Numer 6, 1950.
- Lin, Y. B. Pan, C. L. Kuo, Y. H. Chang, K. C. (2005). *Online Monitoring of highway bridge construction using fibrebragg grating sensors*. Smart Mater. Struct, Tom 14 Numer 5, 1075-1082.
- Lutenco, G. Uchanin, V. Mishchenko, V. Opanasenko, A. (2012). *Eddy Currents Versus Magnetic Particles*. Referat wygłoszony na: 18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban.
- Malahs, M. (2015). *Design of a Low Cost Laser Vibrometer System*. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.
- Malecki, I. Ranachowski, J. (1994). *Emisja akustyczna źródła, metody, zastosowania*. Warszawa: Biuro Pascal.
- Mizerski, J. (2005). *Spawanie wiadomości podstawowe*. Warszawa: Wydawnictwo REA.
- Murawski, L. (2015). *Diagnostyka i monitoring środków transport bazujące na czujnikach światłowodowych*. Logistyka 3/2015, 3395-3404.
- PN-EN 571-1:1999. *Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Zasady ogólne*.
- Pollock, A. (2007). Probability of Detection for Acoustic Emission. Journal of Acoustic Emission, NJ 08550, 231-237.
- Rodwell, P. C. (2008). *Industrial Radiography Safety: Best Practices*, AMMTIAC Quarterly, 16-17.

- Ross, R. J. Geske, E. A. Larson, G. H, Murphy, J. F. (1991). *Transverse Vibration Nondestructive Testing Using a Personal Computer*. USA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Rudowski, G. (1978). *Termowizja i jej zastosowanie*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Sim, C. W. Chau, F. S. Toh, S. L. (1995). *Vibration analysis and non-destructive testing with real-time shearography*. Optics & Laser Technology, Tom 27, 45-49.
- Svoboda, V. Zemlicka, F.(2012). Continuous Monitoring of Storage Tank by Acoustic Emission Method. Referat wygłoszony an: 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada. Granada.
- Tay, A. K. Wilson, D. A. Wood, R. L. (1990). *Microdamage and optical signal analysis of impact induced fracture in smart structures*. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Tom 1370, 328-343.
- Tennyson, R. C. Mufti, A. A. Rizkalla, S. Tadros, G. Benmokrane, B. (2001). *Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fibre optic sensors*. Smart Mater. Struct, Tom 10 Numer 3, 560.
- Uhl, T. (2015). *Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji*. Kraków: AGH.
- Więcek, B. Perkowski, J. Wysocki, M. (2010). *Zastosowanie termowizji do badań architektonicznych obiektów zabytkowych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 245, 31-40.
- Wysocka-Fotek, O. (2011). *Szacowanie wielkości i położenia defektów powierzchniowych za pomocą impulsowej termografii podczerwieni*. Warszawa: Instytut podstawowych problemów techniki Polskiej Akademii Nauk.
- Zergoug, M. Lebaila, S. Kamel, G. (2005). *Characterization of the corrosion by eddy current*, Alger: IEIA.