

# METODY STOSOWANE W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH

**Karol Onosko**

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia zestawienie różnych metod badań nieniszczących. Zostały w nim opisane badania ultradźwiękowe, radiacyjne, penetracyjne, elektromagnetyczne oraz termowizyjne. Pokróćce przedstawiony jest zakres możliwości każdej z technik, jej zalety oraz wady, a także sposoby praktycznego wykorzystania.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, badania ultradźwiękowe, metoda echa, metoda cienia, metoda rezonansu, badania radiograficzne, badanie penetracyjne, badania elektromagnetyczne, badanie termowizyjne

## METHODS USED IN NDT

**Abstract.** This paper presents NDT methods. The text describes ultrasonic testing, radiation, electromagnetic and thermal testing. Presented is a range of possibilities of each technique, advantages and disadvantages, and ways of practical use.

**Keywords:** NDT, ultrasonic testing, the echo method, shadow method, the method of resonance, radiographic testing, penetration testing, electromagnetic testing, thermal testing

## Wstęp

Istnieją dwie grupy badań pozwalających określić stan i właściwości badanego obiektu: niszczące oraz nieniszczące (ang. *Non-Destructive Testing – NDT*). Druga z wymienionych tu grup ma znacznie większy zakres zastosowań. Badania nieniszczące pozwalają uzyskać informacje o obiekcie bez fizycznej ingerencji w jego strukturę, dlatego są znacznie tańszym rozwiązaniem w porównaniu z badaniami niszczącymi. Obszarami, w których chętnie korzysta się z metod nieniszczących są przede wszystkim: przemysł motoryzacyjny, gazowy, petrochemiczny, a także lotnictwo i energetyka. Ogromną zaletą NDT jest nie tylko możliwość oceny jakości eksploatowanych obiektów, ale również takich, które znajdują się jeszcze w trakcie procesu technologicznego.

Każda niejednorodność struktury taka jak: korozja, wtrącenia, rozwarstwienia, pęknięcia itp. powodują zmiany właściwości mechanicznych, ale również ma wpływ na inne parametry np. przewodność elektryczną. Dlatego stosując odpowiednią technikę pomiarową, możliwe jest wykrycie uszkodzenia za pomocą generowanego przez nie zaburzenie sygnału pomiarowego.

## 1. Badania ultradźwiękowe

Ucho ludzkie potrafi wykryć dźwięki z zakresu od 16 Hz do blisko 16 kHz. Fale akustyczne będące powyżej tej granicy i rozciągające się do 100 MHz [8] noszą miano ultradźwięków. Ten właśnie rodzaj fal został zastosowany w jednej z najbardziej popularnych technik badań nieniszczących – badaniach ultradźwiękowych w literaturze fachowej oznaczane skrótem UT [6, 7].



Rys. 1. Zasada przeprowadzania badania [1]

W czasie przeprowadzenia badań ultradźwiękowych wykorzystuje się właściwości badanej struktury takie jak sprężystość oraz jednorodność. Parametry te mają kluczowe znaczenie przy rozchodzeniu się ultradźwięków, powodują bowiem zmiany kierunku oraz czasu przejścia fal wewnątrz badanej struktury. Dzięki temu możliwe jest analizowanie różnego rodzaju materiałów począwszy od gazów, poprzez ciecze, a na ciałach stałych kończąc. UT stosuje się głównie do badań elementów

ze stali ferrytowych, austenitycznych, wykonanych z aluminium, magnezu, miedzi i jej stopów, ołowiu, niklu oraz ceramiki. Szczególnie chętnie metoda jest wykorzystywana przy określeniu jakości złączy spawanych, części maszyn, czy pomiarów grubości [7, 8].

Największym plusem badań ultradźwiękowych są ich niskie koszty w porównaniu z innymi metodami, które mogą być nawet o ponad połowę większe. Kolejną zaletą jest stosunkowo duży zasięg wnikania ultradźwięków w badany element, który może wynosić ponad 10 metrów. Głębokość wnikania zależy w głównej mierze od częstotliwości użytej fali oraz właściwości pochłaniania badanego materiału. Należy także zwrócić uwagę na to, iż badanie ultradźwiękowe łączy w sobie szybkość oraz gwarancję dokładnego zlokalizowania wad. Jednocześnie umożliwia bezpośrednie otrzymanie wyników [8].

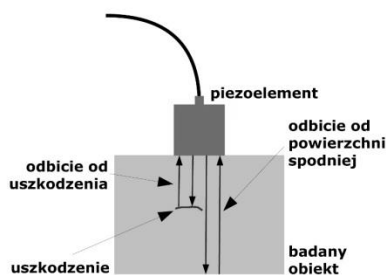
Badanie ultradźwiękowe jest najtrudniejszą metodą spośród badań nieniszczących. Do jego przeprowadzenia potrzebna jest duża wiedza teoretyczna przy jednoczesnym doświadczeniu. Badania UT ze względu na sposób uzyskania informacji można podzielić na trzy metody badawcze: echa, cienia oraz rezonansu.



Rys. 2. Defektoskop ultradźwiękowy [14]

### 1.1. Metoda echa

W metodzie echa informacja zostaje uzyskana poprzez analizę fali odbitej. Odbicie następuje w momencie, gdy fala rozchodząca się w ośrodku trafi na nieciągłość, czyli wadę struktury. Znając prędkość rozchodzenia się fali w badanym ośrodku, można określić lokalizację wady mierząc czas potrzebnego do przebycia fali odbitej [8].



Rys. 3. Zasada przeprowadzania badania ultradźwiękowego metodą echa [13]

## 1.2. Metoda cienia

Do pomiaru w metodzie cienia wykorzystywane są dwa przetworniki. Pierwszy z nich stanowi źródło, drugim jest odbiornik ultradźwięków. Urządzenia montowane są na przeciwległych końcach badanego obiektu. Fala ultradźwiękowa rozchodząc się w strukturze w momencie przejścia przez niejednorodność ulega odbiciu, tym samym osłabiając swoje natężenie. W ten sposób tworzy się „cien” fali ultradźwiękowej, który jest wykrywany przez odbiornik na drugim końcu.

Metoda stosowana jest głównie do badania elementów o niewielkich grubościach takich jak: rurki, blachy, druty o małym przekroju. Spowodowane jest to brakiem możliwości wykrycia głębokości, na jakiej znajduje się wada, a przez to bezużyteczności w wypadku grubszych struktur [8].

## 1.3. Metoda rezonansu

Metoda rezonansu podobnie jak metoda echa wykorzystuje odbicie fali ultradźwiękowej od wady struktury. Różnica polega na tym, iż w tym przypadku informacja o badanym elemencie uzyskiwana jest poprzez obserwację nakładających się fal podającej i odbitej [8]. Wszelkie zmiany częstotliwości i tłumienia drgań względem wartości oczekiwanej świadczą o gorszych właściwościach badanego obszaru lub wystąpieniu wady. Badania pozwala na szybkie wysortowanie wyrobów o parametrach odbiegających od pozostałych.

## 2. Badania radiograficzne

Badania radiograficzne, podobnie jak badania ultradźwiękowe, zaliczane są do badań wolumetrycznych. Obszarami stosowania radiologii w NDT są badania odlewów oraz złączy spawanych wykonanych ze stali, tytanu, miedzi, aluminium i ich stopów, jak również elementów ceramicznych, drewnianych, gum i tworzyw sztucznych. W przypadku elementów o większym stopniu złożoności np. części maszyn, konieczne jest stosowanie odpowiednich zabiegów technicznych lub przystosowanej do tego celu aparatury. Otrzymywana w badaniu radiograficznym informacja umożliwia lokalizację, określenie rodzaju, jak również wielkości wady.

Zasada pomiaru jest podobna jak w ultradźwiękowej metodzie cienia. Tu również po jednej stronie znajduje się przetwornik wysyłający, z tą różnicą, iż w tym przypadku generuje on promieniowanie rentgenowskie. Obiekty poddane badaniu pochłaniają promieniowanie X oraz gamma, które jest dostarczane z zewnętrznego źródła. Po drugiej stronie elementu znajduje się detektor, którym może być błona srebrowa, luminoforowa płyta obrazowa lub przetwornik cyfrowy. Padająca jednorodna wiązka przechodząc przez obiekt, zostaje częściowo pochłonięta. Stopień pochłaniania zależy od wewnętrznego zróżnicowania struktury i widoczny jest na uzyskanym obrazie końcowym. Wady widoczne są jako ciemniejsze obszary o nieregularnych kształtach na jaśniejszym tle obiektu.

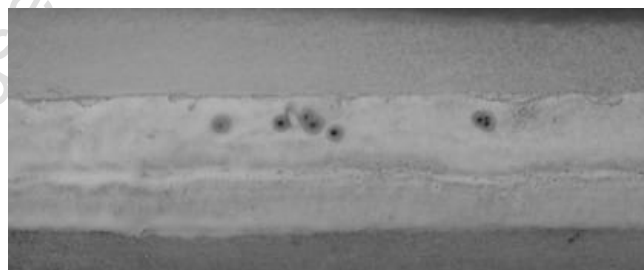
Badania radiacyjne pozwalają na wykrycie różnego rodzaju wad m.in. wtrąceń obcych metali, pęknięć, porowatości, braku przetopu, czy pęcherzy gazowych.

Badania radiograficzne uważane są za najbardziej wiarygodne spośród grupy badań nieniszczących. Jednakże metoda ta jest niezwykle kłopotliwa w realizacji, a co za tym idzie wysokie są jej koszty. Głównym czynnikiem podnoszącym cenę jest konieczność ochrony personelu przed promieniowaniem jonizującym oraz pracochłonność. W ostatnich latach radiografię analogową zaczęto wspierać technikami informatycznymi, przez co tradycyjną kliszę zastąpiono obrazem cyfrowym. Dzięki temu ograniczono koszty, ułatwiono przetwarzanie i przechowywanie danych przy jednoczesnym zwiększeniu dokładności metody [8, 11].

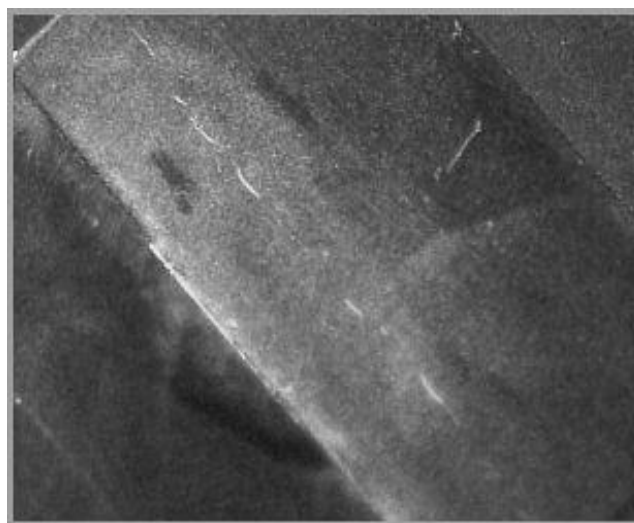
## 3. Badania penetracyjne

W momencie uszkodzenia materiału tworzy się defekt, który może zachowywać się jak kapilara (*lac. capillus – włos*). Powstaje w ten sposób możliwość zajścia zjawiska włoskowatości, które wykorzystywane jest w metodzie penetracyjnej. Zjawisko to oparte jest na powstawaniu ciśnienia powierzchniowego cieczy w wąskich otworach, przez co ciecz ta zostaje zassana do szczeliny powyżej powierzchni swobodnej. W badaniu penetracyjnym stosuje się specjalne medium badawcze zwane penetrantem.

Badanie składa się z kilku części wykonane w odpowiedniej kolejności. Najpierw należy odpowiednio przygotować badaną próbkę poprzez jej oczyszczenie np. przy użyciu szczotki lub też piaskując. W przypadku delikatniejszych powierzchni stosuje się parę wodną pod ciśnieniem lub zmywacze. Kolejnym etapem jest naniesienie penetranta. Odbywa się to poprzez zanurzenie obiektu. W wypadku kiedy jest to niemożliwe nanosi się go przy pomocy pędzla, aerozolu lub w sposób elektrostatyczny. Kiedy ciecz wniknie w szczeliny należy usunąć jej nadmiar i wysuszyć badaną powierzchnię. Następną badanę miejsce pokrywa się wywoływaczem. Substancja kontrastująca z penetrantem powoduje ujawnienie miejsc i wielkości wad. Malujące się w ten sposób na powierzchni nieregularne kształty odpowiadające nieciągłością znajdującym się pod spodem [8].



Rys. 4. Przykład elementu zbadanego przy użyciu techniki barwowej [16]



Rys. 5. Przykład obrazu uzyskanego przy zastosowaniu techniki fluorescencyjnej [16]

Ze względu na rodzaj użytej cieczy penetracyjnej stosowane są trzy techniki badań. W pierwszej z nich – technice barwowej stosuje się ciecze pozwalające na osiągnięcie dużych czułości. Powstający czerwony obraz dobrze kontrastuje na białym tle wywoływacza. W drugiej technice stosowany jest penetrant fluorescencyjny, który jest widoczny pod działaniem promieni UV. Trzecią techniką jest technika barwno-fluorescencyjna łącząca w sobie dwie poprzednie. Uzyskiwany obraz widoczny jest zarówno w świetle widzialnym jak również pod wpływem promieni UV.

Obszarem zainteresowań badań penetracyjnych najczęściej są elementy wykonane z metalu. Nie jest to jednak stała zależność i równie dobrze możliwe jest badanie innych obiektów pod warunkiem, że zastosowany materiał nie jest porowaty oraz jest obojętny na działanie penetranta. Szczególnie chętnie stosuje się tą metodę w przemyśle motoryzacyjnym oraz budownictwie.

Badania penetracyjne należy do najstarszych z spośród metod badań nieniszczących, mimo to jest nadal często stosowana. Powodem tego jest szybkość, prostota oraz stosunkowo tani sposób określenia stopnia uszkodzenia. Możliwe jest również badanie praktycznie w każdych warunkach szerokiej palety materiałów o dowolnym kształcie i rozmiarach. Jedynymi niedogodnościami jest konieczność oczyszczenia powierzchni przed przeprowadzeniem do badania, wpływ temperatury na penetranty, ich starzenie się oraz toksyczność.

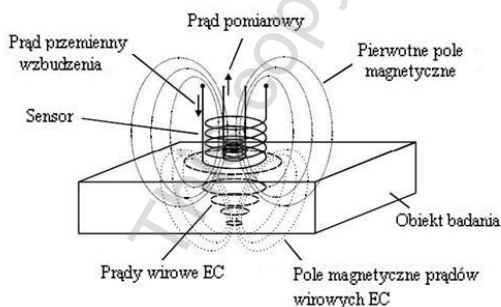
## 4. Badania elektromagnetyczne

W badaniach elektromagnetycznych wykorzystywane są zjawiska zmian rozkładu strumienia magnetycznego w zależności od ośrodka, w którym się rozchodzi. Ten typ badań ma zastosowanie jedynie w określeniu jakości struktur metalowych mogących przewodzić prąd elektryczny. Użyty strumień może wnikać jedynie na niewielką odległość w głąb obiektu, dlatego metody elektromagnetyczne mają charakter powierzchniowy. Do badań elektromagnetycznych zaliczamy dwa typy metod: prądów wirowych oraz magnetyczno-proszkowe.

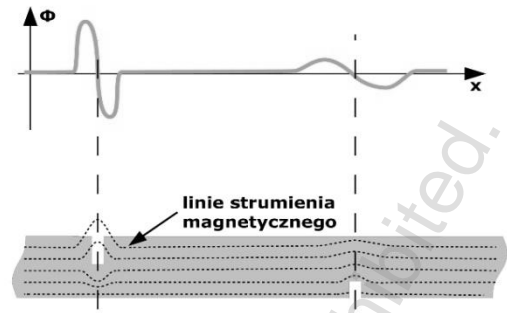
### 4.1. Metoda prądów wirowych

Cewka pod działaniem płynącego w niej prądu elektrycznego generuje zmienne pole elektromagnetyczne. Jeśli w obrębie tego pola znajdzie się obiekt wykonany z przewodnika, wytwarzają się w nim indukcyjne prądy wirowe. Powstałe prądy generują własne pole elektromagnetyczne o przeciwnym zwrocie, osłabiające tym samym pole pierwotne. Powstałe zaburzenie rejestrowane jest przez układ sterujący cewką.

Impedancja cewki jest odwrotnie proporcjonalna do wytworzonych wewnątrz badanego przedmiotu prądów wirowych. Nieciągłości badanego elementu powodują wydłużenie ścieżek, po których poruszają się prądy wirowe. Zmienia to rozkład pól. Przesuwając cewkę ze stałą prędkością i odległością od powierzchni, możliwe jest wykrycie wady na podstawie zmiany prądu cewki. Zaburzenie strumienia świadczy, iż układ pomiarowy znajduje się nad miejscem, gdzie występuje niejednorodność. Analizując amplitudę oraz fazę uzyskanego w ten sposób sygnału, można określić rodzaj uszkodzenia. Informacja o amplitudzie mówi o długości i szerokości wady, natomiast przesunięcie fazowe pozwala określić jej głębokość [5].



Rys. 6. Zasada przeprowadzania badania za pomocą prądów wirowych [13]



Rys. 7. Wpływ niejednorodności na zmiany impedancji cewki [13]

### 4.2. Metoda magnetyczno-proszkowa

Metoda magnetyczno-proszkowa to prosta i szybka metoda badań nieniszczących należących do grupy badań elektromagnetycznych, dająca wiarygodne i jednoznaczne wyniki. Przed przystąpieniem do badania obiekt pokrywa się zawiesziną proszkową zawierającą drobiny ferromagnetyku. Następnie badany element poddaje się działaniom sił pola magnetycznego umieszczając go między biegunami elektromagnesu, jest to wtedy magnesowanie podłużne, lub przepuszczając przez niego prąd, mówi się wtedy o magnesowaniu kołowym. Wytworzone pole magnetyczne oddziałuje na cząstki roztworu powodując ich przemieszczenie i skupianie wokół uszkodzeń, gdzie rozkład sił pola jest zaburzony. Po odparowaniu z zawiesziny części płynnej, na powierzchni osadzają się drobiny ferromagnetyku tworząc wzory. Umożliwia to lokalizację uszkodzeń w badanym elemencie [5].

## 5. Badania termowizyjne

Termowizja to jedna z najprężniej rozwijających się w ostatnim czasie technik pomiarowych. Jest to stosunkowo nowa dziedzina w grupie badań nieniszczących, dlatego nie istnieją jeszcze odpowiednie normy precyzujące ten typ badań.

Dostarczając do badanego elementu energię zmienia on swoją temperaturę. Zmiany temperatury w czasie są obiektem zainteresowania pomiarów termowizyjnych stosowanych do badaniach nieniszczących. Rozkład temperatury zależy przede wszystkim od właściwości badanego elementu takich jak: ciepła właściwego  $c_p$ , przewodność cieplną  $\lambda$  oraz gęstości  $\rho$ . Przyjmując, że wartości te są niezmiennie, jednowymiarowe równanie dyfuzji ciepła w ciele stałym można wyrazić wzorem:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie  $a = \lambda / \rho c_p$  jest współczynnikiem dyfuzji materiału.

Po przekształceniu Laplaca równanie przyjmuje postać:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - sT = 0 \quad (2)$$

Przekształcając dalej równanie otrzymujemy:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{T}{L^2} = 0 \quad (3)$$

gdzie  $L = \sqrt{a/s}$  wyrażona w metrach określa drogę dyfuzji i mówi jak głęboko dostarczone ciepło wnika w strukturę.

Termowizyjne metody w badaniach nieniszczących należą do grupy badań termowizji aktywnej, czyli takich gdzie badany obiekt jest podgrzewany przez dodatkowe wymuszenie. Energia dostarczana może być na wiele sposobów np. optycznie, ultradźwiękami, mikrofalami, przy pomocy prądów wirowych lub mechanicznie. Ze względu na charakter zmian pobudzenia w czasie techniki te dzielimy na termowizję: synchroniczną, z pobudzeniem impulsowym oraz z pobudzeniem zmiennym skokowo [2].

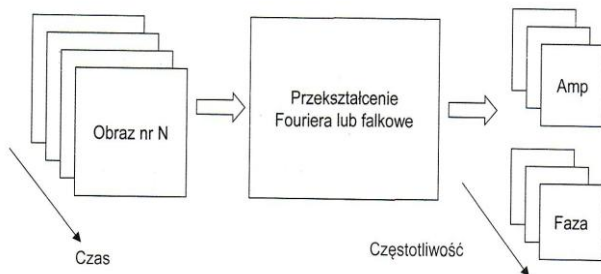
### 5.1. Termowizja synchroniczna

Podstawą termowizji synchronicznej jest pobudzenie w sposób periodyczny badanego obiektu. W wyniku tych działań otrzymywana jest seria obrazów zsynchronizowanych z pobudzeniem. Z zarejestrowanych termogramów stosując przekształcenie Fouriera lub falkowe wyznacza się wartości amplitudy i fazy odpowiedzi termicznej badanego obiektu. Uzyskane dane pozwalają na określenie dyfuzyjności materiału oraz, na jej podstawie, wykrycie zmian w strukturze. Przy czym należy pamiętać, iż droga dyfuzji w przypadku pobudzenia harmonicznego zależy również od pulsacji pobudzenia  $\omega$  i wyrażona jest wzorem:

$$L = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (4)$$

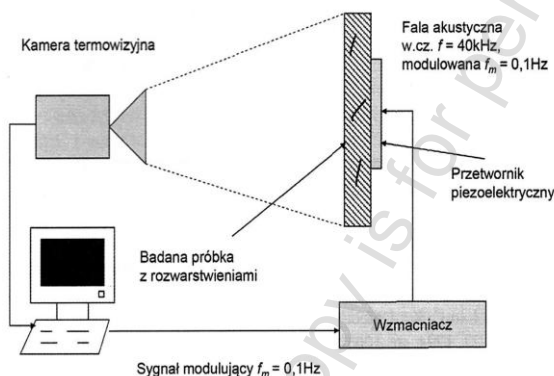
gdzie  $a$  jest dyfuzyjnością materiału.

Z powyższego równania wynika, że zwiększając częstotliwość pobudzenia zmniejsza się głębokość penetracji. Dlatego przystępując do badania przy pomocy termowizji synchronicznej należy odpowiednio dobrać parametry źródła dostarczającego energię do badanego obiektu [2].



Rys. 8. Schemat blokowy algorytmu termowizyjnego badania synchronicznego [2]

W termowizji synchronicznej do podgrzania elementu najczęściej używane są źródła optyczne wysokiej mocy lub generatory prądów wirowych. Ciekawym rozwiązaniem jest również wykorzystanie ultradźwięków. W ostatnim z wymienionych przypadków, periodyczne pobudzenie uzyskuje się po przez modulację z częstotliwością pojedynczych Hz fali ultradźwiękowej. Zmiany temperatury obiektu w czasie rejestrowane są przez kamerę termowizyjną. Na podstawie zebranych danych tworzone są obrazy ilustrujące zaburzenia energii pobudzenia, które odwzorowują niejednorodności badanego elementu.



Rys. 9. Układ pomiarowy do termowizyjnego badania synchronicznego z pobudzeniem ultradźwiękowym [2]

### 5.2. Termowizja z pobudzeniem impulsowym oraz z pobudzeniem zmiennym skokowo

Główną różnicą między metodami termowizyjnymi z pobudzeniem impulsowym i z pobudzeniem zmiennym skokowo jest czas trwania pobudzenia. Gdy mowa o pobudzeniu impulsowym w idealnym przypadku sygnał powinien być kształtem zbliżony do impulsu Diraca. W rzeczywistości takie warunki nigdy nie zostaną spełnione, dlatego należy to uwzględnić przy wyznaczaniu odpowiedzi układu. Wykonuje się to poprzez zastosowanie splotu odpowiedzi impulsowej  $T_{\delta}$  z sygnałem rzeczywistego pobudzenia  $i(t)$ :

$$T(x=0, t) = \int_0^t i(\tau) T_{\delta}(x=0, t-\tau) d\tau \quad (5)$$

W przypadku metody z pobudzeniem zmiennym skokowo czas funkcji  $i(t)$  jest znacznie dłuższy.

Termografię impulsową stosuje się do pomiaru jakości warstw naniesionych na elementy konstrukcyjne. Grubości tych warstw wahają się od kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$  do kilku mm. Metoda nie nadaje się do głębszej penetracji struktur, ponieważ droga dyfuzji  $L$  w tym przypadku zależy od czasu  $t$ , w którym dostarczana jest energia i wyrażona jest zależnością:

$$L = \sqrt{a/s} \quad (6)$$

Największą przewagą technik termowizyjnych w badaniach nieniszczących, w stosunku do innych metod, jest szybkość pomiaru dużych powierzchni. Dodatkowo pomiar ten odbywa się w sposób bezkontaktowy, co w niektórych przypadkach może okazać się niezwykle korzystne [2].

### Literatura

- [1] Lewińska-Romicka A.: Metody diagnostyki urządzeń energetycznych w elektrowniach – badania nieniszczące. elektro.info 2009.
- [2] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczerwienu podstawy zastosowanie. Wydawnictwo PAK, Warszawa 2011.
- [3] <http://www.pcb.com.pl>
- [4] <http://pl.shvoong.com>
- [5] <http://www.technic-control.com.pl>
- [6] <http://www.ndt-net.pl>
- [7] <http://www.ultrandt.pl>
- [8] <http://badania-nieniszczace.com>
- [9] <http://www.ultrazip.pl>
- [10] <http://www.studiumndt.edu.pl>
- [11] <http://www.ndt-cr.pl>
- [12] <http://www.elektro.info.pl>
- [13] <http://www.e-spawalniki.pl>
- [14] <http://www.udt.gov.pl>
- [15] <http://www.megroup.pl>
- [16] <http://www.stalnierzewna.com>
- [17] <http://www.icimb.pl>

#### Mgr inż. Karol Onoszko

e-mail: karol.onoszko@doctorate.put.poznan.pl

Absolwent Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Od 2011 roku student studiów III stopnia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

