

## 2. BADANIA NIENISZCZĄCE

Opracował dr inż. Adam Kruk

### 2.1. Wprowadzenie

Badanie nieniszczące jest to postępowanie, w wyniku którego uzyskuje się informację o występowaniu nieciągłości materiałowych w obiektach, właściwościach materiałów z których są wykonane i wymiarach tych obiektów, bez naruszenia ciągłości ich struktury oraz powodowania zmian ich własności użytkowych.

Do podstawowych metod badań nieniszczących zaliczamy:

- badania wizualne,
- badania metodą penetracyjną,
- badania metodą radiologiczną,
- badania metodą ultradźwiękową,
- badania metodą magnetyczną,
- badania metodą prądów wirowych.

### 2.2. Badania wizualne

Badania wizualne należą do metod „badań powierzchniowych”. Umożliwiają wykrywanie najbardziej niebezpiecznych nieciągłości, jakimi są nieciągłości wąskoszczelinowe. Badania wizualne pozwalają również na wykrywanie niedoskonałości wyrobów, np. wad kształtu, odstępstw wymiarowych, niewłaściwego montażu oraz na wykrywanie nieciągłości powierzchniowych powstających w procesie produkcji. Do nieciągłości powierzchniowych zaliczamy: pęknięcia, pory, zakucia, zawalcowania, podtopienia, wtrącenia, przyklejenia itp., a także uszkodzenia eksploatacyjne takie jak: erozja, pęknięcia zmęczeniowe, nieszczelności, itp.

Badania wizualne mają zastosowanie we wszystkich działach gospodarki od energetyki po pracę służb celnych. Badania wizualne są najprostszą metodą badań i są one obowiązkowe dla wszelkiego rodzaju konstrukcji spawanych.

#### 2.2.1. Metody badań wizualnych

Z definicji badań wizualnych wynika szeroki zakres ich zastosowań, co wymaga stosowania różnych przyrządów lub zestawów badawczych, dobranych odpowiednio do wymagań stawianych w zakresie wykrywalności różnego rodzaju wad.

Badania wizualne dzieli się na:

- *badania wizualne bezpośrednie*, wykonywane na powierzchniach dostępnych bezpośrednio do oględzin. Badania wizualne bezpośrednie wykonywane są okiem nieuzbrojonym, przy użyciu lup a czasem specjalnych mikroskopów.
- *badania wizualne pośrednie*, są to badania wykonywane na powierzchniach wewnętrznych lub zewnętrznych niedostępnych do badań bezpośrednich lub obiektów znajdujących się w strefach działania promieniowania jonizującego. Badania wizualne pośrednie są wykonywane przy użyciu różnego rodzaju lusterek, peryskopów, endoskopów, zestawów wideoskopowych, itp.

#### 2.2.2. Wyposażenie do badań wizualnych

W ostatnich latach nastąpił wyraźny wzrost zainteresowania metodami wizualnymi co doprowadziło do powstania specjalistycznego wyposażenia stosowanego w tych badaniach,

głównie sprzętu endoskopowego ale również różnego rodzaju lup, zestawów lusterkowych, oświetlaczy, itp.

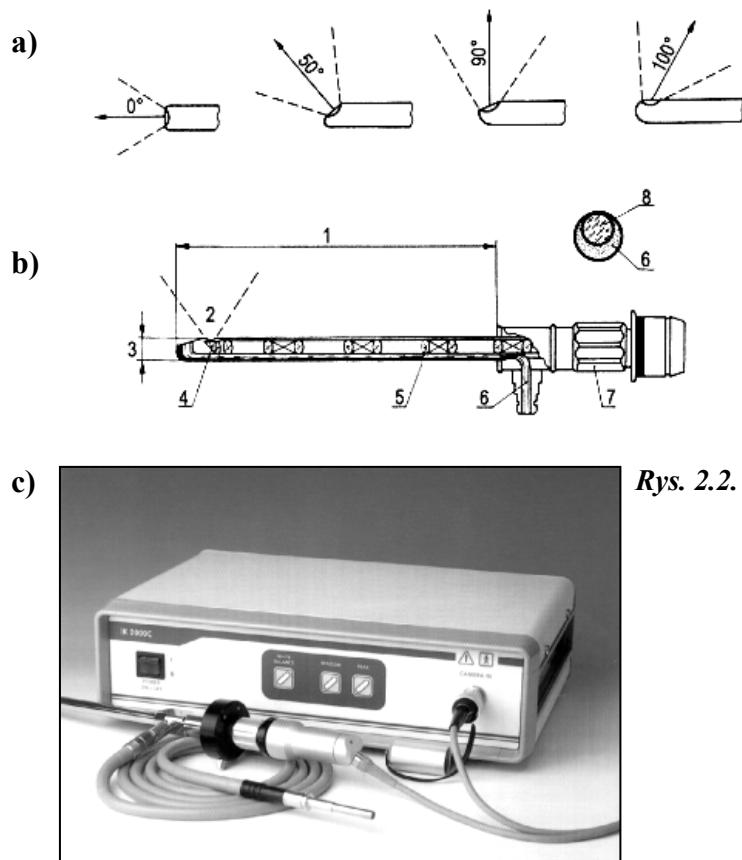


**Rys. 2.1.** Przenośny zestaw mikroskopu piórowego z monitorem i drukarką

Reprodukcia na podstawie materiałów firmy OLYMPUS

Lupy lub tzw. mikroskopy piórowe (**rys. 2.1**), często wyposażone w zintegrowany oświetlacz, są najprostszym przyrządem optycznym umożliwiającym uzyskiwanie powiększeń do 50x.

Endoskopy sztywne (**rys. 2.2**) zwane również boroskopami, są to przyrządy optyczne, składające się z umieszczonego w sztywnej rurce układu soczewek z obiektywem na początku układu i okularem na jego końcu. Integralną częścią każdego endoskopu jest oświetlacz i układ doprowadzający światło do końcówki sondy endoskopu. Pewną uniwersalizację endoskopów sztywnych uzyskano przez zastosowanie pryzmatu w układzie obiektywu, którego obrót pozwala na zmianę kierunku widzenia.



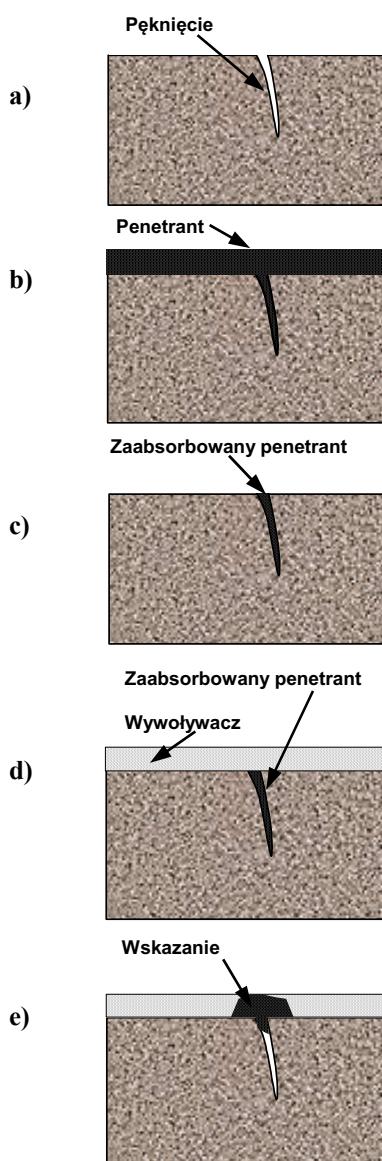
**Rys. 2.2.** Schemat budowy i wygląd endoskopu sztywnego: a) kierunki widzenia, b) przekrój endoskopu, gdzie: 1 - długość robocza, 2 - pole widzenia, 3 - średnica sondy, 4 - pryzmat do ustawienia pola widzenia, 5 - soczewki, 6 - włókna światłowodowe do transmisji światła z oświetlacza, 7 - okular z regulacją, 8 - system optyczny, c) widok endoskopu sztywnego

Reprodukcia na podstawie materiałów firmy Wolf Richard Wolf GmbH

Endoskopy giętkie zwane inaczej fiberoskopami, są to przyrządy optyczne z elastyczną sondą, wykonaną ze światłowodu, która obraz z obiektywu transmitem do okularu endoskopu. Na końcówkę sondy montowane są wymienne głowiczki obiektywowe o różnym kącie pola widzenia i dwóch kierunkach widzenia – na wprost ( $0^\circ$ ) i bocznym ( $90^\circ$ ). Układ sterowania fiberoskopu umieszczony z reguły w głowicy okularowej, daje możliwość sterowania końcówką sondy, oraz umożliwia zmianę ogniskowej układu optycznego.

### 2.2.3. Przebieg wizualnego badania obiektów

Stan powierzchni, rodzaj obróbki powierzchniowej, ślady korozji, zabrudzenia i pokrycia mają wpływ na własności optyczne badanego obiektu. Dlatego właściwe przygotowanie powierzchni obiektu ma istotny wpływ na wynik badania. Ważne jest również odpowiednie oświetlenie badanego obiektu. Zalecane natężenie wynosi 500 lx (luksów), a minimalne natężenie oświetlenia nie może być mniejsze niż 350 lx. Podczas badań należy zwrócić uwagę na kąt obserwacji i odległość między powierzchnią badaną, a okiem badającego. Kąt patrzenia nie powinien być mniejszy niż  $30^\circ$  a odległość przedmiotu badanego od oka nie powinna przekraczać 600 mm. Uzyskanie wystarczającego kontrastu wymaga dobrania odpowiedniego kierunku wiązki światła. W badaniach bezpośrednich przyjmuje się, że wiązka światła powinna padać na badaną powierzchnię pod kątem  $45^\circ \div 85^\circ$ .



Rys. 2.3. Zasada badań metodą penetracyjną

### 2.3. Metoda penetracyjna

Badania penetracyjne są podstawową metodą badań nieniszczących „powierzchniowych”. Są metodą względnie prostą, nie wymagającą drogiej aparatury pomiarowej, co decyduje o powszechności jej stosowania. Badania penetracyjne są zwykle badaniami wstępymi do innych badań nieniszczących. Umożliwiają wykrywanie otwartych nieciągłości powierzchniowych lub podpowierzchniowych. Metody penetracyjne umożliwiają poszukiwanie drobnych nieciągłości również w obiektach wykonanych nie tylko z materiałów ferromagnetycznych ale również paramagnetycznych (np. w stopach metali lekkich, stalach austenitycznych), które nie mogą być badane metodami magnetycznymi.

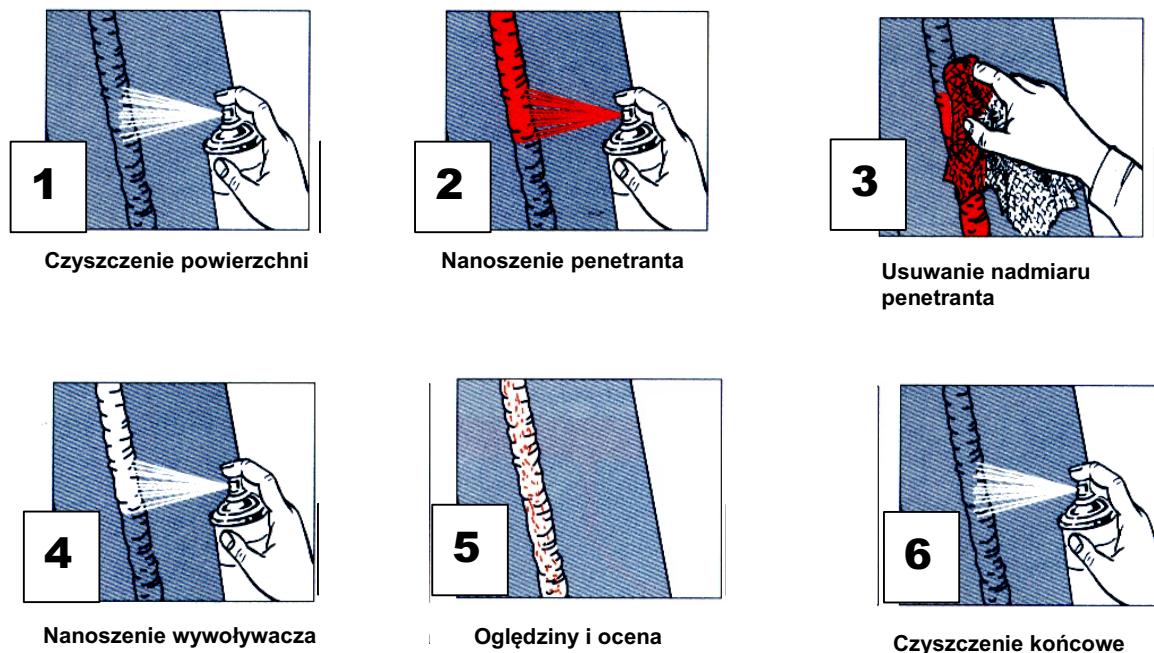
#### 2.3.1. Charakterystyka metody penetracyjnej

Badania metodą penetracyjną (rys. 2.3) opierają się na wnikaniu penetranta do cienkich nieciągłości tworzących kapilary (rys. 2.3b), dzięki zjawisku włoskowatości. Penetrantem jest ciecz o małym napięciu powierzchniowym, odpowiedniej lepkości i zwilżalności powierzchni badanych obiektów oraz o małej gęstości. Ujawnianie wad na powierzchni obiektów odbywa się dzięki oddziaływaniu tzw. wywoływacza z penetrantem (rys. 2.3e). Oddziaływanie to polega na wysysaniu penetranta z nieciągłości. Zdolność do

zwilżania powoduje, że penetranty i wywoływacze tworzą cienkie, równomierne warstwy na powierzchni obiektów o gładkiej powierzchni. Zbyt duża lepkość penetrantów utrudnia i zwiększa czas ich wnikania. Zbyt mała natomiast powoduje skłonność do wymywania penetranta z nieciągłości.

Wywoływacz, szczególnie jeśli stosuje się penetranty barwne, jest również środkiem kontrastującym. Kontrast jest uzyskiwany poprzez dużą różnicę barwy między penetrantem (np. kolor czerwony), a wywoływaczem (kolor biały). Innym sposobem na uzyskanie kontrastu jest zastosowanie penetrantów fluorescencyjnych, dających silny kontrast podczas obserwacji w świetle ultrafioletowym. Ważnym zadaniem w badaniach penetracyjnych jest usuwanie nadmiaru penetranta z powierzchni badanego obiektu. Zastosowanie penetrantów zmywalnych wodą (do wykrywania płytowych pęknięć powierzchniowych) może powodować usunięcie ich z nieciągłości podczas usuwania nadmiaru penetranta z powierzchni badanego obiektu.

Metoda penetracyjna umożliwia kontrolę obiektów w zakresie temperatur od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Końcowym etapem badania metodą penetracyjną jest usunięcie z badanego przedmiotu naniesionego wywoływacza przy użyciu odpowiednich środków zwanych zmywaczami. Przebieg kolejnych etapów (od 1 do 6) badania połączeń spawanych metodą penetracyjną przedstawiono schematycznie na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Kolejne etapy badania metodą penetracyjną połączenia spawanego

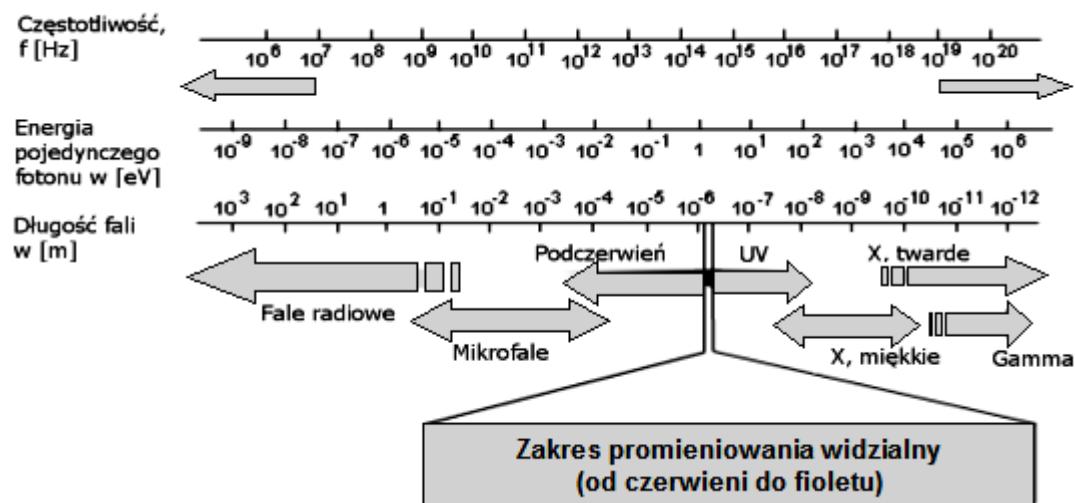
## 2.4. Metoda radiologiczna

Metoda radiologiczna należy do metod „badań objętościowych”. Pozwala wykrywać wady wewnętrzne które są położone na kierunku rozchodzenia się promieniowania. Wysoka wykrywalność, jak i dostępność przenośnych źródeł promieniowania elektromagnetycznego X i  $\gamma$  sprawiają, że metoda ta jest obecnie powszechnie stosowana w badaniach materiałów i elementów konstrukcyjnych. Z uwagi na obecność promieniowania jonizującego koniecznym jest jednak przestrzeganie szczególnie rygorystycznych, w porównaniu z innymi metodami, norm BHP.

Badanie metodą radiologiczną polega na:

- naświetleniu obiektu promieniowaniem jonizującym, najczęściej promieniowaniem rentgenowskim (X), wytworzonym w lampie rentgenowskiej lub promieniowaniem gamma ( $\gamma$ ), otrzymanym ze sztucznych źródeł izotopowych,
- rejestracji cieniowanych obrazów nieciągłości (radiogramów),
- ocenie radiogramów.

Na rys. 2.5 przedstawiono w sposób poglądowy zakres częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego stosowanego w tej metodzie. Twarde promieniowanie rentgenowskie, jak również promieniowanie gamma, ze względu na bardzo krótką długość fali należy do bardzo przenikliwych, co daje to możliwość badania grubych obiektów.

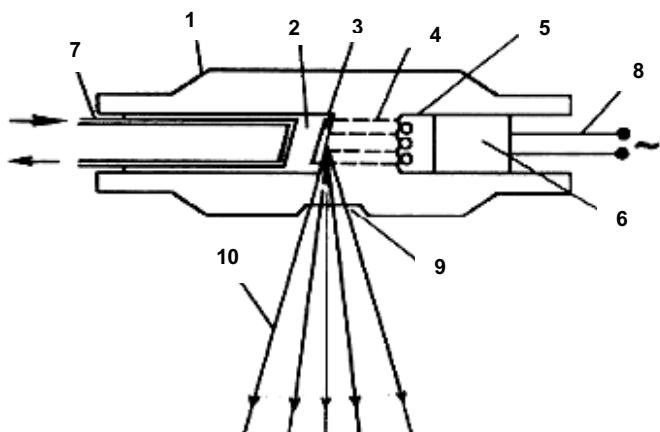


Rys. 2.5. Poglądowa zależność między częstotliwością, energią i długością fali dla promieniowania elektromagnetycznego

Na radiogramach uzyskuje się dwuwymiarowe obrazy trójwymiarowych nieciągłości. Obrazy nieciągłości przedstawiają kształt i wymiar nieciągłości w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Różnica w stopniu zaczernienia radiogramów w miejscu występowania obrazu nieciągłości i poza tym obszarem (kontrast), zawiera informację o wymiarach nieciągłości (stopniu osłabienia promieniowania) w kierunku rozchodzenia się promieniowania.

#### 2.4.1. Źródła promieniowania X i $\gamma$

Fotony promieniowania X wytwarzane są przez dwa różne procesy atomowe. Jeden z nich wytwarza tzw. „promieniowanie hamowania”, drugi zaś tworzy „promieniowanie charakterystyczne” wskutek przejścia elektronów z wyższych powłok elektronowych na powłokę K, najbliższą jądra atomowego. Oba procesy występują w ciężkich atomach takich jak np. atomy wolframu. Wolfram jest najczęściej stosowanym materiałem na tarcze anody w lampach rentgenowskich. Na rys. 2.6 przedstawiono schematycznie proces powstawania promieniowania X w lampie rentgenowskiej. Strumień elektronów emitowany przez katodę zostaje przyspieszony w polu elektrycznym o napięciu kilkuset kilowolt wytworzonym pomiędzy katodą i anodą lampy rentgenowskiej. Strumień ten pada na tarczę (ognisko rzeczywiste lampy rentgenowskiej) anody lampy. Wyhamowane na materiale anody wysokoenergetyczne cząstki jakimi są elektrony, wytwarzają fotony promieniowania X. Emitowane widmo promieniowania X składa się z rentgenowskiego widma hamowania (widmo ciągłe) oraz charakterystycznego widma rentgenowskiego (widmo prażkowe).



Rys. 2.6. Schemat lampy rentgenowskiej:

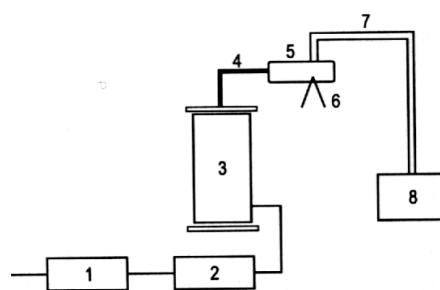
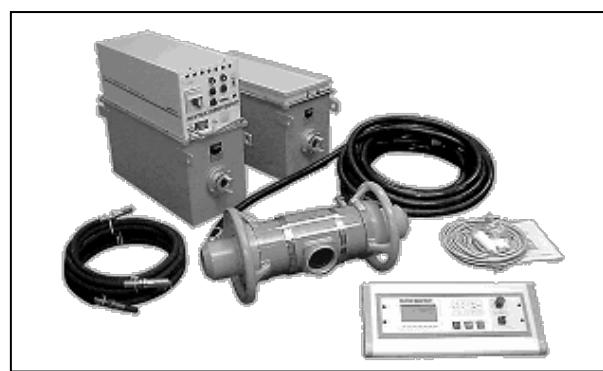
- 1 - obudowa lampy,
- 2 - anoda,
- 3 - ognisko,
- 4 - strumień elektronów,
- 5 - włókno żarzenia katody,
- 6 - katoda ,
- 7 - chłodzenie anody,
- 8 - doprowadzenie prądu żarzenia,
- 9 - okienko lampy,
- 10 - wiązka promieniowania X

Różnica między promieniowaniem X i  $\gamma$  leży w sposobie jego wytworzenia. Ponieważ źródłem promieniowania  $\gamma$  są radioaktywne izotopy, widmo promieniowania  $\gamma$  jest wyłącznie widmem prążkowym. Do wytworzenia promieniowania  $\gamma$  może być wykorzystany radioaktywny izotop kobaltu. Radioizotop  $^{60}_{27}\text{Co}$  po wysłaniu promieniowania  $\beta$  (wysokoenergetyczne elektryny) przekształca się w izotop niklu  $^{60}_{28}\text{Ni}$ , który staje się stabilny po wyemitowaniu kwantu promieniowania  $\gamma$ .

Promieniowanie jonizacyjne przechodząc przez badany obiekt ulega osłabieniu. Liniowy współczynnik osłabiania  $\mu$  zależy od energii promieniowania, jego rodzaju, a przede wszystkim od gęstości ośrodka przez który przechodzi. Różne wartości współczynnika osłabiania dla różnych materiałów, a więc różny stopień osłabiania promieniowania przez wady wewnętrzne w badanych obiektach, jest przyczyną powstawania kontrastu na radiogramach.

Źródłami promieniowania w metodzie radiologicznej są:

- Źródła promieniowania X (aparaty rentgenowskie o napięciach anodowych wynoszących zwykle od 150 do 450 kV; przenośny zestaw do badań radiologicznych przy wykorzystaniu promieniowania rentgenowskiego przedstawiono na rys. 2.7a).
- Źródła wysokoenergetycznego promieniowania (akceleratory liniowe, betatrony).
- Źródła promieniowania gamma (izotopy promieniotwórcze Selen-75, Iterb-169, Cez-137, Kobalt-60).

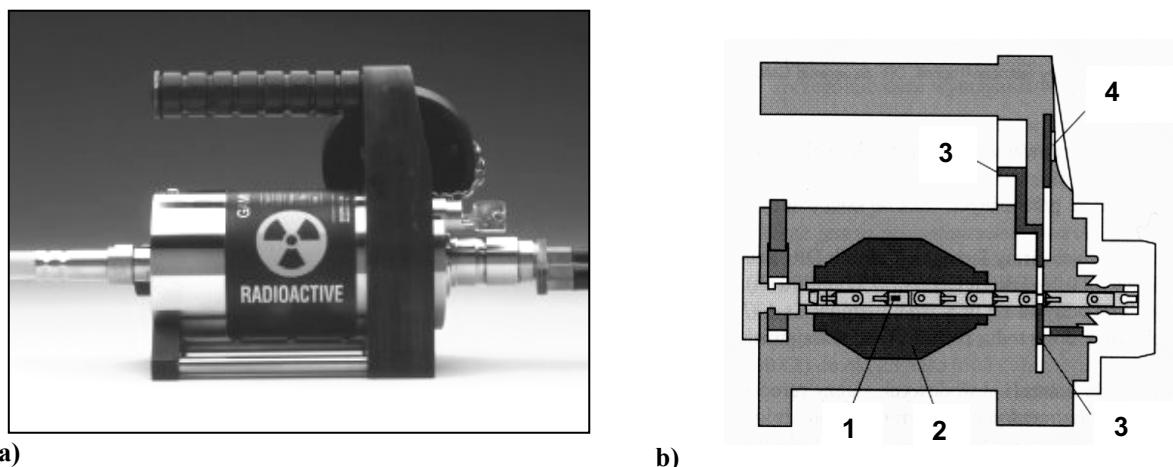


Rys. 2.7. Kołpakowy, przenośny aparat do badań rentgenowskich z lampą jednobiegunkową. a) widok ogólny, b) schemat blokowy aparatu rentgenowskiego gdzie: 1- urządzenie sterujące, 2-układ zasilania, 3-generator wysokiego napięcia, 4-kable wysokiego napięcia, 5-lampa rentgenowska, 6-wiązka promieniowania, 7-przewody łączące lampę z układem chłodzenia, 8-układ chłodzenia wodą.

Reprodukcja na podstawie materiałów firmy Pantak Seifert

Urządzenie do badań promieniami gamma i jego schemat blokowy przedstawiono na rys. 2.8. Do badań radiograficznych przy wykorzystaniu promieniowania gamma stosowane są przenośne

aparaty gammagraficzne, w których źródło nie opuszcza pojemnika ochronnego. Do głównych zalet aparatów gammagraficznych należy zaliczyć to, że nie wymagają dostępu do sieci zasilania, wykazują dużą niezawodność, łatwość obsługi, mają małą masę oraz mniejszy koszt jednostkowy w porównaniu z aparatami rentgenowskimi.



**Rys. 2.8.** Aparat do badań gammagraficznych: a) widok ogólny aparatu GAMMAMAT SE, b) budowa aparatu gammagraficznego, gdzie: 1-źródło, 2-osłona uranowa, 3-mechanizm zabezpieczający, 4-wskaźnik polożenia źródła

Reprodukcja na podstawie materiałów firmy MDS Nordion S.A.

#### 2.4.2. Detektory promieniowania X i $\gamma$

Błona fotograficzna (radiograficzna) jest nadal głównym materiałem do rejestracji i archiwizacji wyników badań radiologicznych. Błona radiograficzna jest materiałem wielowarstwowy. Podłożo, część nośna błon wykonana jest z poliestru lub trójoctanu celulozy o grubości ok. 0,18 mm. Na to przeźroczyste i elastyczne podłożo z obu stron jest nanoszona emulsja fotograficzna, zawierająca halogenki srebra oraz warstwa utwardzana żelatyną, przeciwdziałająca naprężeniom i zawierająca środki matujące. Nanoszenie warstwy emulzji fotograficznej z obu stron ma na celu uzyskanie dużej czułości błon, dzięki sumowaniu gęstości optycznej obu warstw.

Wybór rodzaju błony uzależniony jest od wymogów prowadzonego badania. Oferowane są błony fotograficzne do stosowania:

- bez okładek wzmacniających,
- z okładkami wzmacniającymi lub osłabiającymi metalowymi (fluorescencyjnymi lub fluorometalicznymi).

Płyty selenowe, fosforowe i krzemowe umożliwiają cyfrowy zapis radiogramów. Technika cyfrowa w czasie rzeczywistym, pozwala przyspieszyć i zautomatyzować proces badania i uniknąć kosztownej błony jako detektora. Pozwala również obrabić elektronicznie obraz radiograficzny, zwiększać dzięki temu wykrywalność wad oraz archiwizować komputerowo wyniki badań.

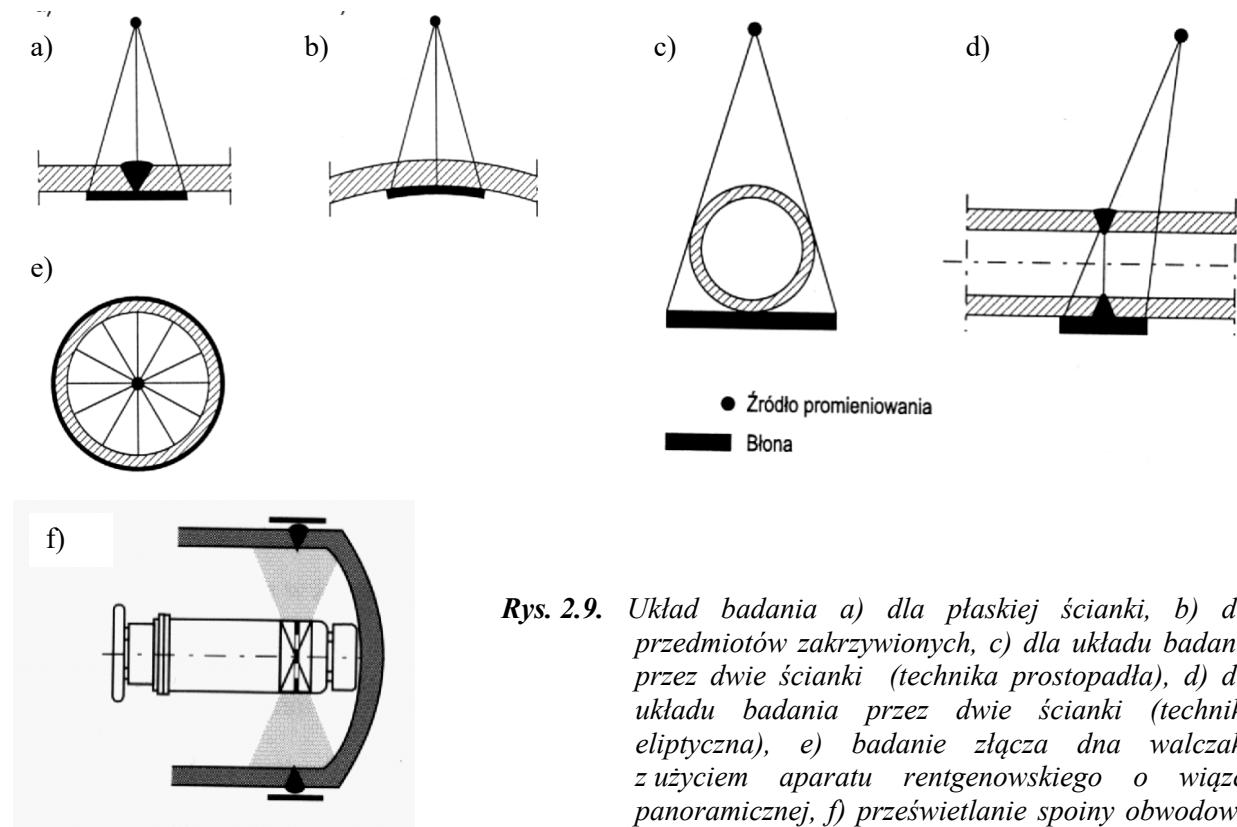
Radioskopija cyfrowa rozwijana jest na bazie mikrodetektorów scyntylacyjnych z fotodiodami oraz płyt detekcyjnych z materiałów bezpostaciowych (amorficznych). W pierwszym przypadku foton promieniowania X lub gamma przetwarzane są w impulsy świetlne (scyntylacje) a następnie zamieniane w impulsy elektryczne, wzmacniane i przetwarzane w obraz cyfrowy. Poszczególne piksele takiego obrazu odpowiadają pojedynczemu mikrodetektorowi z fotodiodą. Wymiary tych detektorów wynoszą ok. 0,1 mm. Konfigurowane są one w formie detektorów liniowych lub powierzchniowych.

Radiografią "bezpośrednią" został nazwany drugi system, w którym zastosowano detektor w postaci warstwy bezpostaciowego selenu, przetwarzającego fotony X w ładunki elektryczne, które mogą być zbierane i rejestrowane przez układ tranzystorowy. Nazwa "bezpośrednia" radiografia wynika z faktu, że pomijany jest etap przetwarzania promieni X w światło i dopiero po tym w sygnał elektryczny. Dzięki ominięciu transformacji świetlnej, uzyskano bardzo wysoką, zbliżoną do błony radiograficznej zdolność przekazu i czułość kontrastową. Warstwa bezpostaciowego selenu o wymiarach 14"x17" (ok. 355 x 430 mm) zawiera 7.9 milionów pikseli o wymiarze 139 mikronów. W obu przypadkach obrazy są rejestrowane na CD-ROM i dzięki temu mogą być łatwo archiwizowane, drukowane na drukarkach o wysokiej rozdzielczości i przesyłane elektronicznie.

### 2.4.3. Przebieg badania

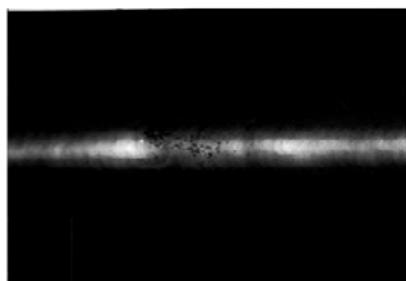
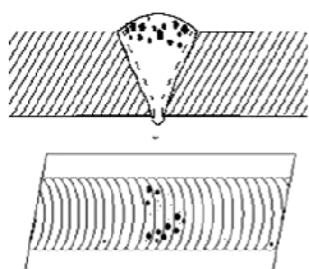
Przebieg badania radiologicznego składa się z następujących etapów:

- dobór energii, rodzaju i źródła promieniowania,
- dobór kierunku i sposobu naświetlania badanego obiektu (**rys. 2.9**),
- dobór błony fotograficznej i czasu ekspozycji,
- naświetlanie,
- wywoływanie błony radiograficznej,
- interpretacja radiogramu,
- sporządzenie raportu z badań radiologicznych.

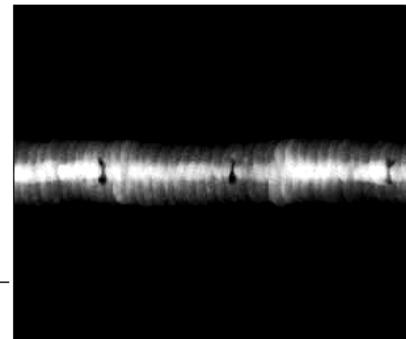
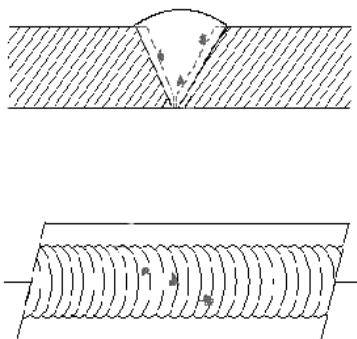


**Rys. 2.9.** Układ badania a) dla płaskiej ścianki, b) dla przedmiotów zakrzywionych, c) dla układu badania przez dwie ścianki (technika prostopadła), d) dla układu badania przez dwie ścianki (technika eliptyczna), e) badanie złącza dna walczaka z użyciem aparatu rentgenowskiego o wiązce panoramicznej, f) prześwietlanie spoiny obwodowej dna zbiornika, wg Anny Lewińskiej - Romickiej

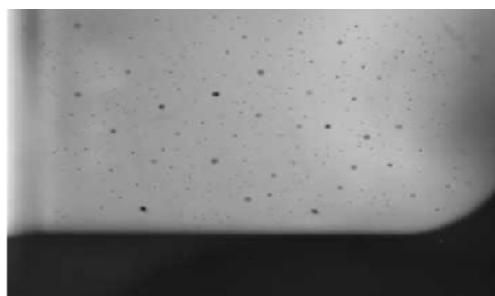
Na **rys. 2.10 i 2.11** pokazano radiogramy oraz rysunki spoin doczołowych zawierających wewnętrzne pory (rys. 2.10) i wtrącenia żużla (rys. 2.11). Na **rys. 2.12** pokazano radiogramy ujawniające wewnętrzne nieciągłości w postaci pęcherzy i wtrąceń.



**Rys. 2.10.** Schemat spawanego złącza doczołowego oraz radiogram ujawniający skupiska pęcherzy gazowych  
Reprodukcia na podstawie materiałów NDT Resource Center



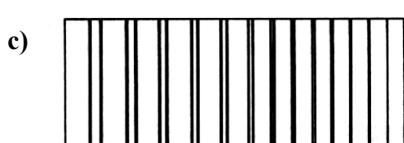
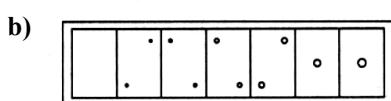
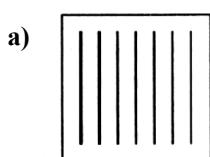
**Rys. 2.11.** Schemat spawanego złącza doczołowego oraz radiogram ujawniający wtrącenia żużli na granicy spoina spawany materiał  
Reprodukcia na podstawie materiałów NDT Resource Center



**Rys. 2.12.** Radiogram ilustrujący wewnętrzne nieciągłości materiałowe w arkuszu blachy stalowej  
Reprodukcia na podstawie materiałów NDT Resource Center

#### 2.4.4. Wskaźniki jakości obrazu

Jakość obrazu radiograficznego określa się stopniem widoczności szczegółów. Dzięki zastosowaniu wskaźników (wskaźniki pręcikowe, schodkowo - otworowe oraz pręcikowe typu „duplex”, rys. 2.13) jakość obrazu radiograficznego jest określana, np. wielkością średnicy najmniejszego, widocznego na radiogramie wskaźnika typu pręcikowego.



**Rys. 2.13.** Wskaźniki jakości obrazu:  
a) pręcikowy,  
b) schodkowo-otworowy,  
c) pręcikowy typu „duplex”

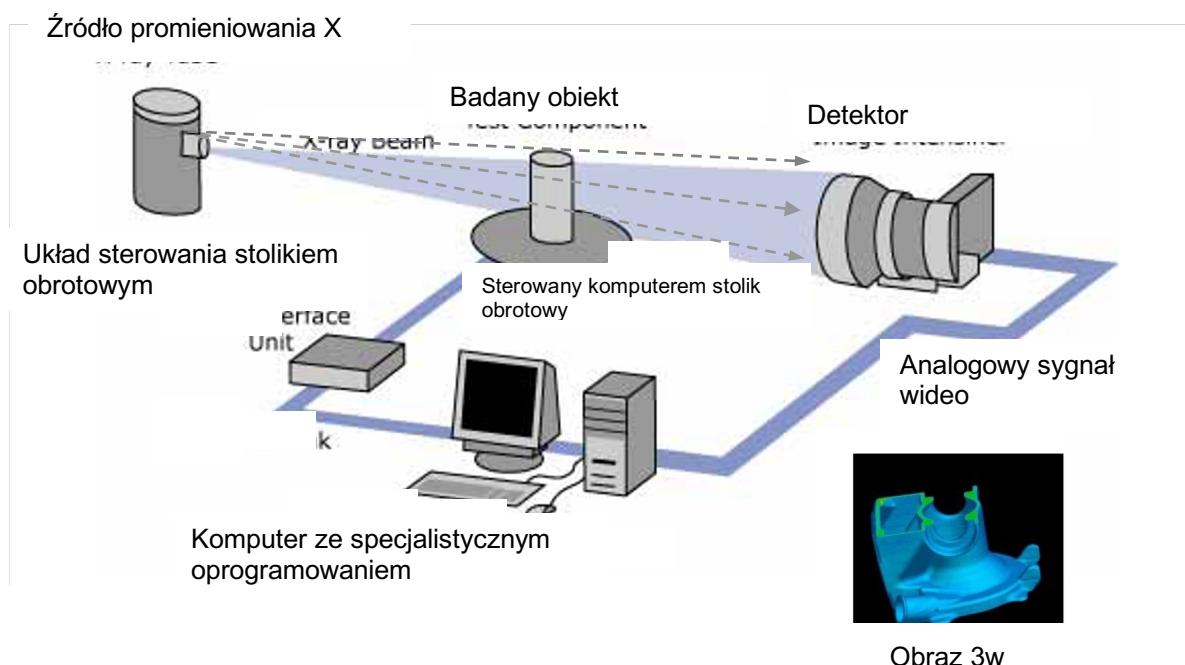
## 2.4.5. Czynniki wpływające na jakość obrazu radiograficznego

Jakość obrazu uzyskanego w badaniach radiologicznych ma decydujący wpływ na poziom detekcji tak więc na wykrywalność wad tą metodą. Czynnikami wpływającymi na jakość obrazu w badaniach radiologicznych są:

- *kontrast*: energia promieniowania, promieniowanie rozproszone, zaczernienie, zadyminie;
- *nieostrość*: wielkość ogniska, odległość źródła od obiektu, odległość błony od obiektu, energia promieniowania;
- *ziarnistość*: czułość błony, obróbka fotochemiczna błony.

## 2.4.6. Nowoczesne systemy radiograficzne

Tomografia komputerowa jest nowoczesną techniką badania obiektów. Daje ona możliwości uzyskania dwuwymiarowych (2w) obrazów przekrojów poprzecznych obiektów jak również tworzenia wizualizacji trójwymiarowej (3w) na podstawie zarejestrowanych płaskich obrazów rentgenowskich. System tomografu komputerowego przedstawiono schematycznie na rys. 2.14. Badany obiekt jest umieszczany na obrotowym stoliku pomiędzy źródłem promieniowania a detektorem. Stolik obrotowy oraz detektor są połączone z komputerem, co pozwala na korelację obrazów dwuwymiarowych z położeniem badanego obiektu. Specjalistyczne oprogramowanie umożliwia wytworzenie obrazu radiograficznego dowolnego przekroju poprzecznego badanego obiektu.



Rys. 2.14. Schemat układu do tomografii komputerowej  
Reprodukcja na podstawie materiałów firmy AEA TECHNOLOGY

## 2.5. Metoda ultradźwiękowa

Metoda ultradźwiękowa pozwala na identyfikację wad wewnętrznych w badanych obiektach. Należy do metod „badań objętościowych”. Pozwala w zależności od rodzaju wprowadzanych do obiektów fal ultradźwiękowych wykrywać również nieciągłości powierzchniowe i podpowierzchniowe.

Badania ultradźwiękowe polegają na wprowadzeniu do obiektu fali ultradźwiękowej (fali sprężystej) oraz rejestracji sygnałów odbitych od wad wewnętrznej budowy i powierzchni swobodnych obiektu.

Metoda ta jest szczególnie przydatna do kontroli dużych i grubych obiektów, np. kęsów, prętów, ale także i rur. Metoda ultradźwiękowa jest stosowana do kontroli obiektów w hutnictwie, energetyce jądrowej i konwencjonalnej, przemyśle lotniczym, okrętowym, samochodowym, chemicznym, budownictwie i kolejnictwie.

### 2.5.1. Rodzaje i własności fal ultradźwiękowych

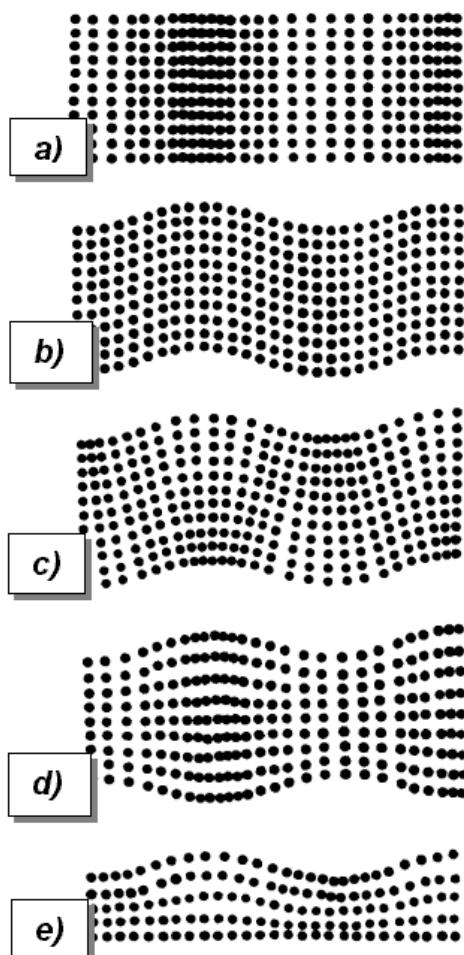
Ultradźwięki są to drgania mechaniczne cząstek ośrodka wokół położenia równowagi o częstotliwości ponad 20 kHz. W zależności od skutków można ultradźwięki podzielić na czynne i bierne. Ultradźwiękami czynnymi nazywamy fale ultradźwiękowe, które rozchodząc się

w ośrodku wywołują w nim zmiany fizyczne lub chemiczne, tak jak ma to miejsce w przypadku czyszczenia, wiercenia, zgrzewania, terapii, tworzenia emulsji i zawiesin, oddziaływanego na małe organizmy, komórki itp. Ultradźwięki bierne, które w odróżnieniu od czynnych są o wiele mniejszej (zazwyczaj pomijalnej) mocy, są stosowane do wykrywania wewnętrznych wad materiału, w ultradźwiękowej technice pomiarowej lub diagnostyce medycznej.

Rozchodzące się fale ultradźwiękowe różnią się sposobem ruchu cząstek ośrodka w stosunku do kierunku przemieszczania się fali. Najczęściej wystającymi i najlepiej poznawanymi są fale podłużne, przy których cząstki ośrodka drgają prostoliniowo, zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fali (**rys. 2.15a**). Przy takim ruchu powstają na przemian zagęszczenia i rozrzedzenia cząstek ośrodka, przy czym dochodzi również do oscylacyjnych zmian jego objętości. Fale te mogą rozchodzić się w każdym ośrodku, zarówno stałym, ciekłym jak i gazowym.

Innym rodzajem fal są fale poprzeczne, które mogą rozchodzić się tylko w ośrodkach stałych o wymiarach znacznie większych od długości fali  $\lambda$ . Fale poprzeczne są spolaryzowane, ponieważ cząstki ośrodka drgają tylko w jednym kierunku, w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali (**rys. 2.15b**). Przy obróceniu źródła fal poprzecznych zmianie ulega również płaszczyzna drgań cząstek. Rozchodzeniu się tych fal nie towarzyszy zmiana objętości ośrodka. Prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych jest zawsze mniejsza od prędkości fal podłużnych.

W ośrodkach takich jak płyty czy pręty, których rozmiary są w jednym lub w dwóch kierunkach zbliżone do długości fali, mogą rozchodzić się fale Lamba, określane w defektoskopii jako fale płytowe. Występują one w dwóch postaciach, jako



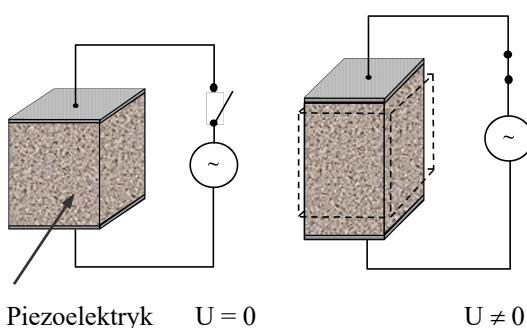
**Rys. 2.15.** Drgania cząstek ośrodka przy rozchodzeniu się fal: a) podłużnej, b) poprzecznej, c) antysymetrycznej (giętnej) fali płytowej Lamba, d) symetrycznej (dylatacyjnej) fali płytowej Lamba, e) powierzchniowej Rayleigha

fale antysymetryczne (giętne - **rys. 2.15c**) oraz jako fale symetryczne (dylatacyjne -**rys. 2.15d**).

Na powierzchni swobodnej ciała stałego mogą rozchodzić się fale powierzchniowe (Rayleigha), które wnikają na głębokość (równą w przybliżeniu) jednej długości fali (**rys. 2.15e**). Podobnym rodzajem fal powierzchniowych są fale Love'a. Są to fale, przy których cząstki ośrodka drgają tylko poprzecznie w płaszczyźnie równoległej do powierzchni swobodnej. Występują one w bardzo cienkich warstwach ośrodka stałego połączonego sztywno z innym ośrodkiem stałym.

## 2.5.2. Wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych

Jednym ze sposobów wytwarzania fal ultradźwiękowych jest wykorzystanie odwracalnego zjawiska piezoelektrycznego, charakterystycznego dla niektórych materiałów. Jeżeli do cienkiej płytki piezoelektryka, posrebrzonej na obu płaszczyznach, przyłożymy zmienne w czasie napięcie  $U$  to grubość płytki będzie się zmieniała zgodnie z fazą przyłożonego napięcia (**rys. 2.16**). Częstotliwość rezonansowa takiego układu jest zależna od rodzaju piezoelektryka,



Rys. 2.16. Zmiana wymiarów elementu piezoelektrycznego na skutek przyłożenia napięcia elektrycznego

sposobu jego wycięcia względem osi krystalograficznych oraz jego wymiarów. Tak wzbudzony do drgań element piezoelektryczny, przyłożony do badanego obiektu staje się źródłem fali sprężystej. W praktyce ten sam element piezoelektryczny wykorzystuje się również jako odbiornik fal ultradźwiękowych. Wykorzystuje się wtedy zjawisko przeciwnie, polegające na tym, że ciśnienie akustyczne fali ultradźwiękowej dochodzącej do elementu piezoelektrycznego wywoła zmianę jego wymiarów, co powoduje powstanie na elektrodach napięcia proporcjonalnego do ciśnienia akustycznego fali ultradźwiękowej.

W technice ultradźwiękowej jako materiały piezoelektryczne znalazły zastosowanie:

- kryształy naturalne (kwarc ( $\text{SiO}_2$ ), turmalin),
- kryształy sztuczne (siarczan litu ( $\text{LiSO}_4$ )),
- polikrystaliczne materiały ceramiczne – piezoceramiki (tytanian baru ( $\text{BaTiO}_3$ )).

Materiały te są stosowane do budowy głowic ultradźwiękowych.

W badaniach ultradźwiękowych stosowane są następujące ich rodzaje:

- głowice normalne fal podłużnych,
- głowice podwójne fal podłużnych,
- głowice skośne fal poprzecznych,
- głowice fal powierzchniowych,
- głowice mozaikowe.

## 2.5.3. Osłabienie fal ultradźwiękowych

Energia fali ultradźwiękowej przechodzącej przez ośrodek zmniejsza się, a przez to maleje również jej ciśnienie akustyczne, zależnie od własności ośrodka. Powodami tego osłabienia są:

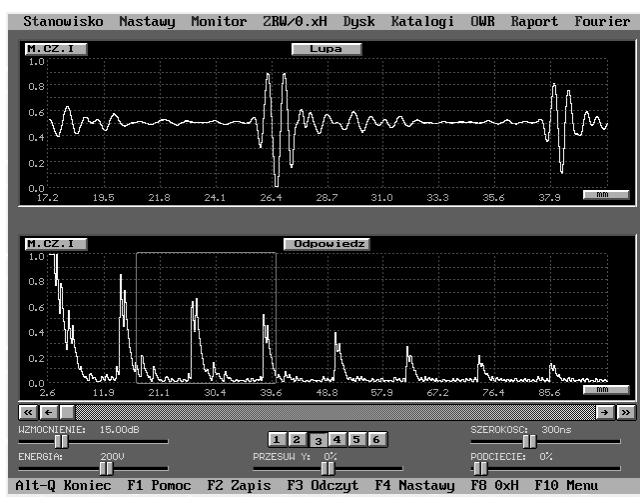
- Pochłanianie energii (absorpcja) fali ultradźwiękowej, wskutek tarcia wewnętrznego energią mechaniczną drgających cząstek zamieniającą się wówczas w energię cieplną. Z tym rodzajem osłabienia spotykamy się we wszystkich stanach skupienia materii.
- Odbicie, załamanie, dyfrakcja i rozproszenie fal ultradźwiękowych. Te rodzaje osłabienia, występują w ośrodkach niejednorodnych i polikrystalicznych o nieidealnych własnościach sprężystych. Jego przyczyną jest odbijanie fal ultradźwiękowych od poszczególnych granic ośrodków różniących się impedancją akustyczną. W materiałach

polikrystalicznych typowymi przykładami powstawania strat w wyniku rozproszenia są granice ziarn. Natomiast poszczególne ziarna (kryształy) są anizotropowe, mają więc różne własności sprężyste w różnych kierunkach i związaną z tym odmienną prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych.

#### 2.5.4. Defektoskopy

Powszechnie stosowanymi aparatami w ultradźwiękowej technice pomiarowej są przyrządy impulsowe zwane defektoskopami. Defektoskopy współpracują z głowicami ultradźwiękowymi. Charakterystyczną cechą defektoskopu impulsowego jest krótkie pobudzenie głowicy, która emisuje do badanego ośrodka „impulsową” falę ultradźwiękową oraz odbiera i obrazuje impulsy powstałe w wyniku odbicia fal od obszarów o innych własnościach akustycznych (**rys. 2.17**). Każdy defektoskop wyposażony jest zatem w nadajnik i odbiornik impulsów oraz układ zobrazowania. W zależności od konstrukcji układu zobrazowania defektoskopy impulsowe dzielimy na:

- defektoskopy analogowe w których sygnał z odbiornika obrazowany jest w postaci wykresu „napięcie – czas” na ekranie lampy oscyloskopowej,
- defektoskopy analogowo - cyfrowe w których sygnał analogowy zostaje przekształcony na postać cyfrową i przy wykorzystaniu odpowiedniego oprogramowania, wyświetlany w formie wykresu „napięcie – czas” na ekranie monitora.

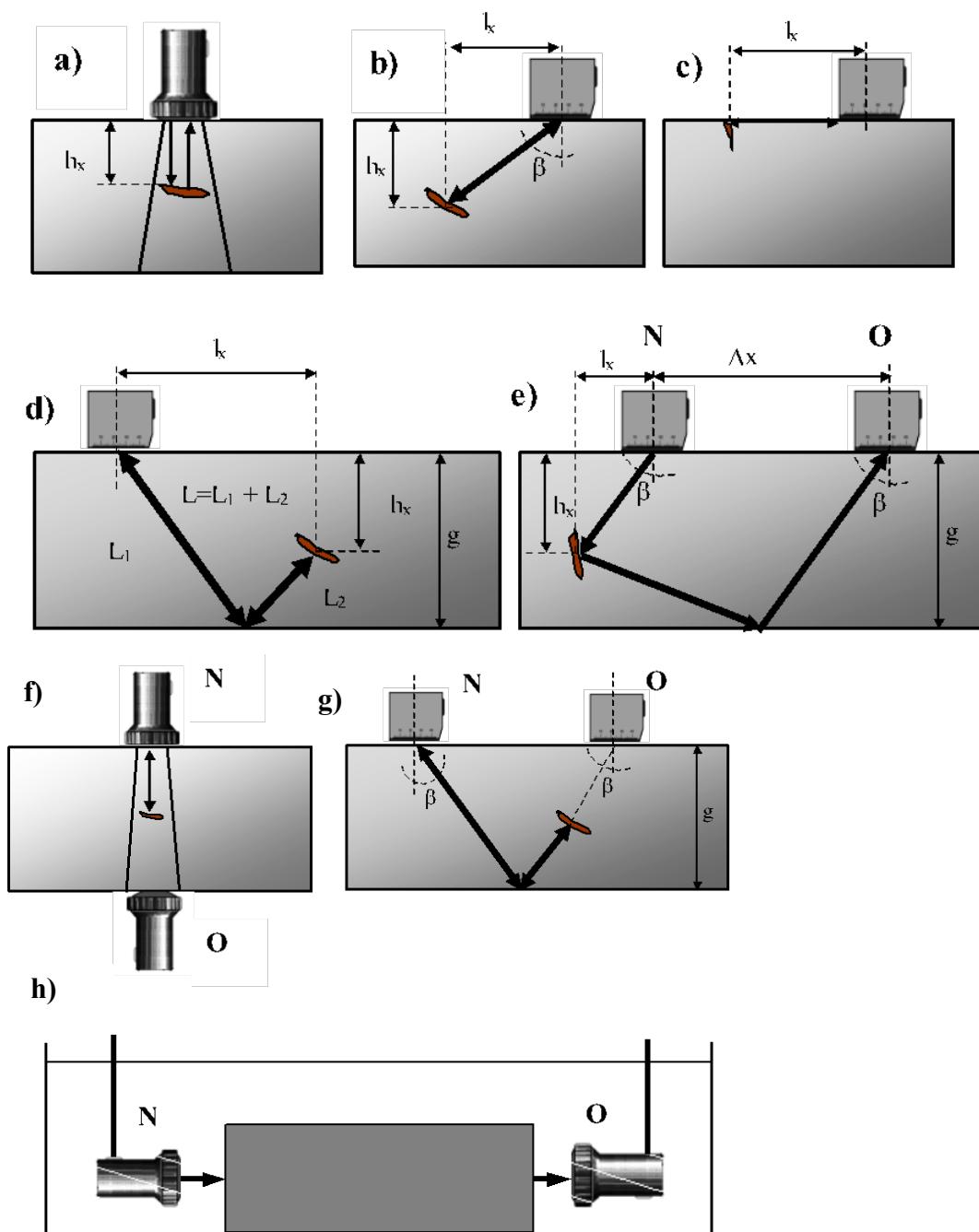


**Rys. 2.17.** Zobrazowanie ciągu słabnących ech dna próbki z głowicy normalnej umieszczonej na płaskiej próbce (w dolnej części ekranu). W górnej części ekranu powiększono fragment z części dolnej

#### 2.5.5. Metody badań ultradźwiękowych

Przy wykrywaniu wad, ocenie ich wielkości i ocenie własności materiałów, stosuje się różne metody i różne „geometrie” badania (**rys. 2.18**). Ze względu na sposób przyłożenia głowicy do badanego elementu rozróżniamy:

- *metody kontaktowe*, gdy głowica lub układ głowic przyłożone są bezpośrednio do powierzchni badanego przedmiotu przez bardzo cienką warstwę ośrodka sprzągającego celem uzyskania dobrego kontaktu akustycznego,



**Rys. 2.18.** Metody badań ultradźwiękowych: a) kontaktowa metoda echo z wykorzystaniem głowicy fal podłużnych, b,d) głowicy fal skośnych, e) głowicy fal powierzchniowych, e,f,g) kontaktowa metoda cienia z wykorzystaniem głowicy nadawczej N i odbiorczej O, h) metoda zanurzeniowa. N - głowica nadawcza, O - głowica odbiorcza, g - grubość próbki,  $\beta$  - kąt wprowadzenia fali ultradźwiękowej dla głowicy kątowej,  $h_x$  - głębokość zalegania wady,  $L_1$ ,  $L_2$  - droga fali ultradźwiękowej w badanym obiekcie,  $l_x$  - odległość przesunięcia głowicy.

- metody zanurzeniowe, gdy głowice i badany przedmiot są zanurzone w cieczy zapewniającej kontakt akustyczny; głowice są wówczas oddalone od powierzchni badanego przedmiotu.

Ze względu na sposób identyfikacji wad rozróżniamy:

- metodę echo, gdy wada identyfikowana jest na podstawie obserwacji tzw. „echu wady”; na ekranie defektoskopu uzyskujemy wówczas impuls jako efekt odbicia fal od wady,

- metodę przejścia (cienia), gdy wada jest przeszkodą na drodze fal między głowicą nadawczą i odbiorczą; obserwuje się wtedy zmniejszenie amplitudy lub zanik impulsu przejścia na ekranie defektoskopu.

Ocenę rozmiaru wad płaskich, usytuowanych równolegle do powierzchni badania i mających wymiary większe od przekroju wiązki możemy określić przesuwając głowicę nad wadą. Ocena rozmiaru wady w tym wypadku sprowadza się do wyznaczenia jej konturu powierzchniowego. Ocena rozmiaru wad małych jest utrudniona z uwagi na różny ich kształt przestrzenny i różną orientację względem wiązki ultradźwiękowej. Rozwiążaniem tego problemu może być wyrażenie rozmiaru wady rzeczywistej za pomocą rozmiaru wady wzorcowej umieszczonej w takiej samej odległości od głowicy jak wada rzeczywista.

## 2.6. Metoda magnetyczna

Metoda magnetyczna jest metodą opartą na działaniu linii sił pola magnetycznego. Metoda ta ma zastosowanie do kontroli obiektów wykonanych z materiałów ferromagnetycznych; np. stali, żeliw oraz staliw, zawierających ferryt. Daje możliwość wykrywania najbardziej niebezpiecznych wad powierzchniowych, płaskich i wąskoszczelinowych. Do podstawowych nieciągłości materiałów wykrywanych tą metodą możemy zaliczyć pęknięcia powierzchniowe w tym kuźnicze, zmęczeniowe, hartownicze, szlifierskie, przyklejenia, zawałcowania, zakucia, rozerwania, pęcherze, itp.

### 2.6.1. Badanie obiektów metodą magnetyczną

Wykrywanie nieciągłości za pomocą metod opartych na działaniu linii sił pola magnetycznego polega na ujawnianiu lub mierzeniu magnetycznych pól rozproszenia. Rozproszenie pola magnetycznego występuje wskutek lokalnych zmian przenikalności magnetycznej w miejscach nieciągłości i wad. Badania obiektów polegają na magnesowaniu obiektów oraz detekcji magnetycznego pola rozproszenia, w miejscach powierzchniowych i podpowierzchniowych nieciągłości materiałowych.

Najlepszą wykrywalność uzyskuje się, jeżeli kierunek pola magnetycznego wzbudzonego w obiekcie jest prostopadły do istniejących wad. Wykrywanie wad jest możliwe dopóki linie sił pola są skierowane pod kątem min.  $45^\circ$  do płaszczyzny wady. Detekcja magnetycznego pola rozproszenia, pojawiającego się nad wadami, może następować: podczas magnesowania obiektów, (badania w polu wzbudzonym pełnym), w sposób zwłoczny po wcześniejszym magnesowaniu obiektów, (badania w polu wzbudzonym szczątkowym).

Obserwacja przebiegu linii sił pola magnetycznego w badanym obiekcie (**rys. 2.19**), którego materiał zawiera niejednorodności albo nieciągłości wykazuje, że:

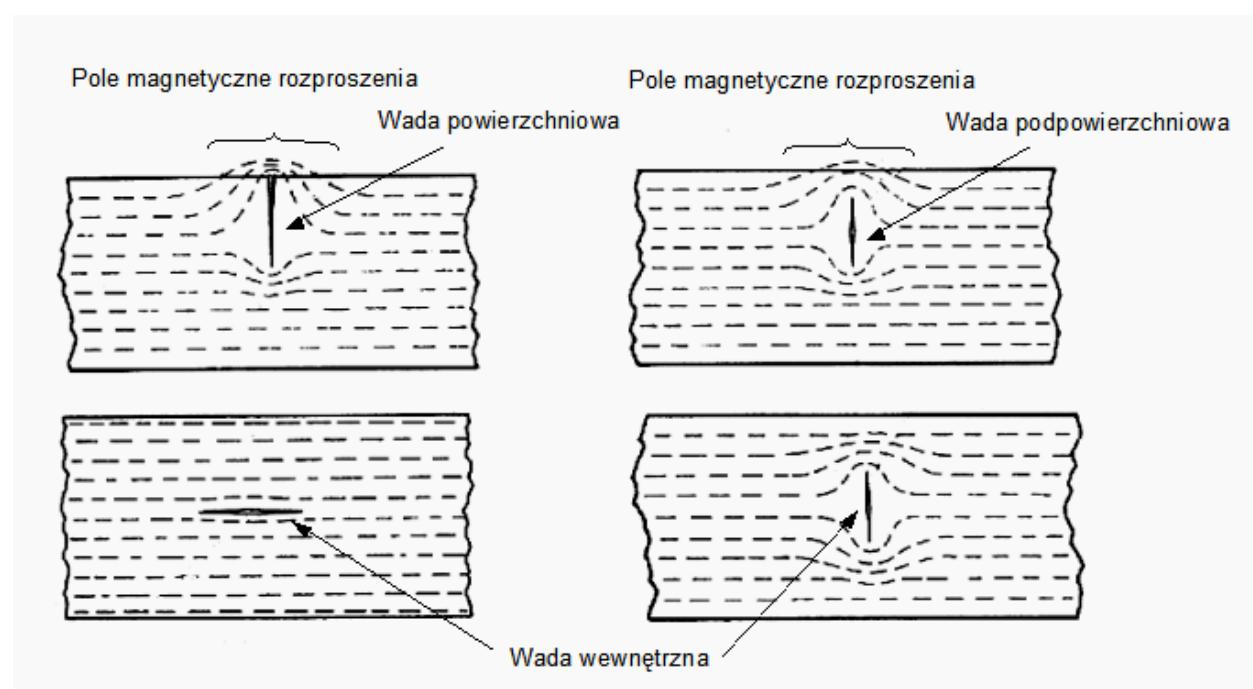
- największa część linii omija miejsce nieciągłości, dlatego na brzegach pęknięcia dochodzi do zagęszczenia linii sił,
- część linii sił biegnie drogą początkową, także i przez miejsca wadliwe,
- reszta linii zostaje w pewnej odległości od wad odchylona od początkowego kierunku i wychodzi z powierzchni przedmiotu w pobliżu wady, zgodnie z prawem załamania linii sił pola magnetycznego, prawie prostopadłe w otaczającą przestrzeń powietrzną.

Zjawisko to określa się jako magnetyczny strumień rozproszenia.

Dla wytworzenia łatwo wykrywalnego strumienia rozproszenia, konieczne jest aby miejsce wadliwe znajdowało się na powierzchni lub tuż pod powierzchnią przedmiotu. Pola rozproszenia tworzą się także przy wadach usytuowanych wewnętrz materialu, są jednak o wiele słabsze i nie da się ich wykryć na powierzchni (rys. 2.19).

W zależności od sposobu detekcji magnetycznego pola rozproszenia rozróżnia się:

- metodę magnetyczno-proszkową,
- metodę z wykorzystaniem przetworników pola magnetycznego.



**Rys. 2.19.** Zasada badania obiektów przy wykorzystaniu metody magnetycznej, powstanie magnetycznego strumienia rozproszenia, wg Anny Lewińskiej - Romickiej

## 2.6.2. Magnetyczna metoda proszkowa

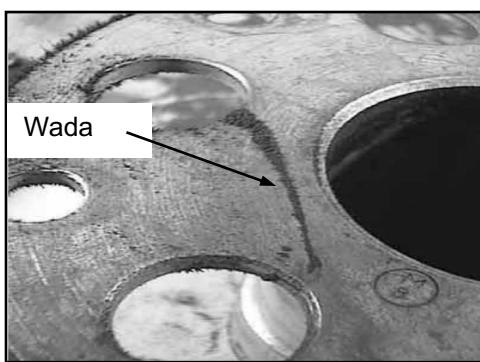
W metodzie magnetyczno-proszkowej detektorami wad (magnetycznego strumienia rozproszenia) obiektów są:

- proszki magnetyczne w postaci pylistej, stosowane w metodzie magnetyczno - proszkowej suchej,
- zawiesiny magnetyczne, stosowane w metodzie magnetyczno - proszkowej mokrej.

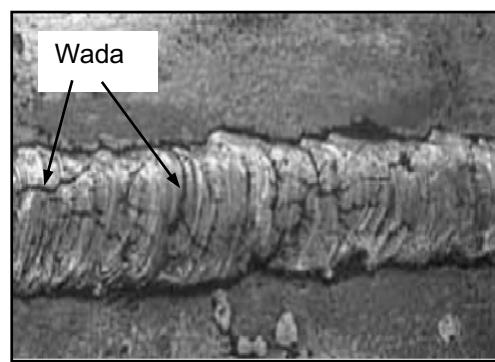
Stosuje się różne pigmente proszków:

- czarne (ogłędziny w świetle widzialnym białym naturalnym lub sztucznym),
- barwne (ogłędziny w świetle widzialnym białym naturalnym lub sztucznym),
- fluorescencyjne (ogłędziny w świetle ultrafioletowym),
- barwno - fluorescencyjne (ogłędziny w świetle białym/ultrafioletowym).

W wyniku badań obiektów metodą magnetyczno - proszkową otrzymywane są defektogramy proszkowe, tj. skupiska proszku magnetycznego odwzorowujące wady obiektów bezpośrednio na powierzchni obiektów (**rys. 2.20 i 2.21**).



**Rys. 2.20.** Ujawnione pęknięcia w stalowym elemencie  
Reprodukcja na podstawie materiałów NDT  
Resource Center



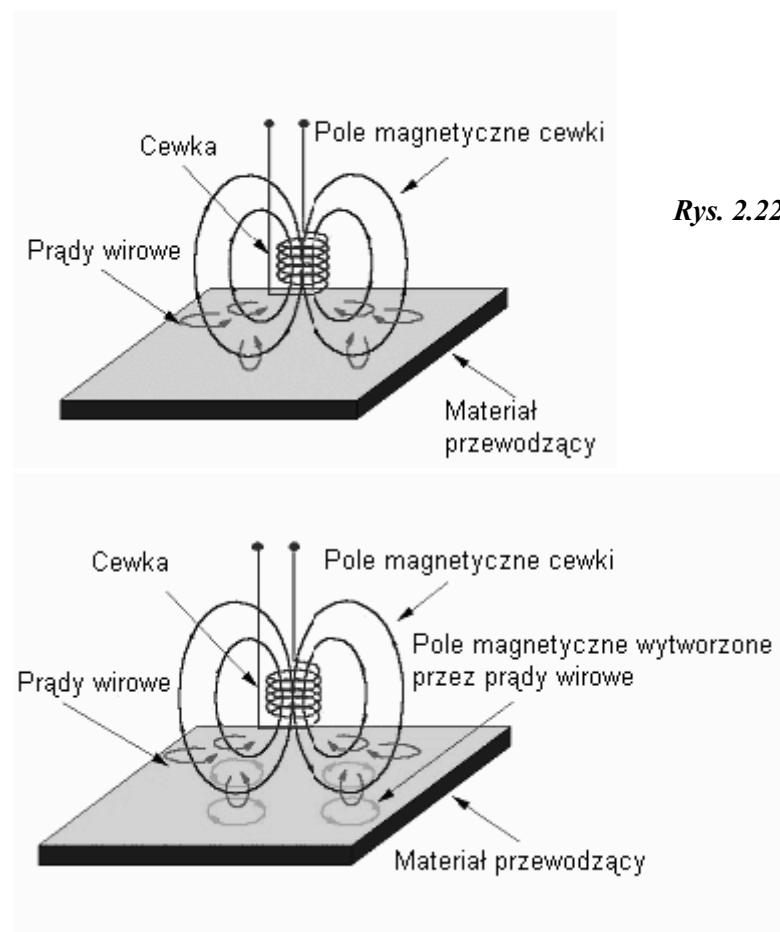
**Rys. 2.21.** Ujawnione pęknięcia w złączu  
spawanym

Metoda ta pozwala otrzymywać tylko jakościowe wskazania wady, natomiast nie daje informacji o głębokości znalezionego pęknięcia. Z tej przyczyny metodę proszkową uzupełnia się innymi metodami wykrywania pola rozproszenia, wykorzystując do tego celu różnego rodzaju sondy umożliwiające ocenę głębokości wady.

Przy badaniach magnetycznych metodą proszkową oddzielnym problemem są tzw. wady pozorne. Mianem wad pozornych określa się tworzenie skupisk proszku magnetycznego w miejscach o zróżnicowanych przenikalnościach magnetycznych. Zjawisko wady pozornej może wystąpić w wyrobach o złożonym kształcie i nagłych zmianach przekroju poprzecznego. Nierównomierny rozkład pola magnetycznego może wystąpić również w przedmiocie o nieskomplikowanym kształcie, np. w następstwie nie centrycznego układu elektrod podczas przepuszczania prądu w trakcie magnesowania.

## 2.7. Badania obiektów metodą prądów wirowych

Metody prądów wirowych (metody indukcyjne) stosowane w badaniach nieniszczących, polegają na wykrywaniu różnic własności fizycznych materiału badanych elementów, za pomocą zmiennego pola magnetycznego. Badany element o określonych wymiarach, wykonany z materiału o danej przewodności elektrycznej właściwej i przenikalności magnetycznej, wprowadza się w zmienne pole magnetyczne cewki (spełniającej jednocześnie) funkcję czujnika), zasilanej prądem zmiennym. Pod wpływem tego pola w badanym elemencie indukują się prądy wirowe, które wytwarzają własne pole magnetyczne, skierowane przeciwnie do pola cewki. W rezultacie w obrębie cewki powstaje pole wypadkowe różne od pierwotnego. Zmiana, jakiej doznaje pole cewki wskutek wprowadzenia metalowego elementu, zależy od elektrycznych i magnetycznych własności materiału badanego (rys. 2.22 i 2.23).



**Rys. 2.22.** Prądy wirowe wytworzone w obiekcie przewodzącym prąd elektryczny przez zmienne pole magnetyczne cewki.  
Reprodukacja na podstawie materiałów NDT Resource Center

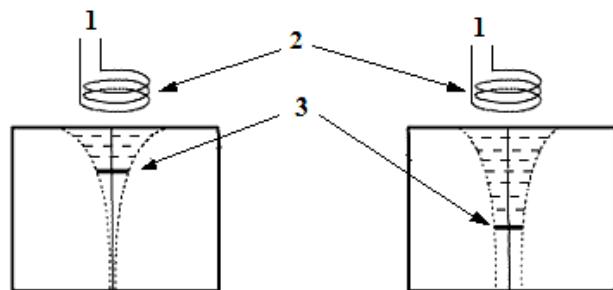
**Rys. 2.23.** Pole magnetyczne wytworzone przez prądy wirowe.  
Reprodukacja na podstawie materiałów NDT Resource Center

W zależności od rodzaju cewki rozróżnia się metodę cewki stykowej oraz metodę cewki przelotowej. W metodzie cewki stykowej, przykłada się cewkę do powierzchni badanego elementu i zasila prądem zmiennym o określonej częstotliwości oraz poprzez odpowiedni układ pomiarowy mierzy się wielkość oddziaływania pola prądów wirowych wzbudzonych w badanym materiale pod wpływem pierwotnego pola cewki na parametry cewki. W przypadku metody cewki przelotowej badane elementy, z reguły o przekroju okrągłym, jak rury, pręty, druty przesuwa się przez cewkę. Również w tym przypadku mierzy się efekt wpływu pola magnetycznego prądów wirowych wytworzonych przez pole cewki na parametry cewki.

Prądy wirowe powstają w obiektach przewodzących prąd elektryczny, dzięki zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Indukują się w obiektach jedynie wtedy, gdy na obiekt oddziałuje zmienne w czasie pole magnetyczne. Jeśli zmienne pole magnetyczne obejmuje obiekt, wykonany z materiału przewodzącego prąd elektryczny (rys. 2.22), to w obiekcie tym indukuje się zmienne, wirowe pole elektryczne, którego napięcie jest nazywane siłą elektromotoryczną indukcji elektromagnetycznej. Kierunek prądu wirowego (indukcyjnego) w obiektach metalowych jest taki, że strumień magnetyczny przez ten prąd wywołyany przeciwodziła zmianom strumienia magnetycznego, dzięki którym prąd indukcyjny powstał. Prądy wirowe preferują miejsca o większej przewodności, opływają nieciągłości obiektów. Strumień magnetyczny, wywołyany przez prądy wirowe odejmuje się od strumienia, który ich powstanie wywołał. Za tak zwaną standardową głębokość wnikania pola magnetycznego i prądów wirowych przyjęto uważać taką głębokość penetracji  $\delta$ , przy której amplituda tych wielkości zmniejsza się e-krotnie (tj. ok. 2,72 razy) w stosunku do ich wartości na powierzchni obiektu (**Tabela 1**). Na **rys. 2.24** przedstawiono w sposób poglądowy wpływ częstotliwości pola magnetycznego oraz własności elektromagnetycznych materiału na głębokość wnikania prądów wirowych.

**Tabela 1.** Standardowe głębokości wnikania  $\delta$  prądów wirowych do obiektów wykonanych z materiałów o różnej przewodności elektrycznej właściwej i przenikalności magnetycznej względnej  $\mu'$ , wg Anny Lewińskiej - Romickiej

Częstotliwość f, Hz	Wolfiam $\gamma = 18,2 \text{ MS/m}$ $\mu' = 1$	Miedź $\gamma = 58 \text{ MS/m}$ $\mu' = 1$	Mosiadz (MC70) $\gamma = 14,5 \text{ MS/m}$ $\mu' = 1$	Stal austenityczna $\gamma = 1 \text{ MS/m}$ $\mu' = 1$	Stal ferromagnetyczna $\gamma = 5 \text{ MS/m}$ $\mu' = 9,4$	Stal ferromagnetyczna $\gamma = 7,5 \text{ MS/m}$ $\mu' = 21$	Stal ferromagnetyczna $\gamma = 10 \text{ MS/m}$ $\mu' = 100$	Stal ferromagnetyczna $\gamma = 6 \text{ MS/m}$ $\mu' = 200$
Standardowe głębokości wnikania $\delta$ prądów wirowych, mm								
0,01	37,06	20,76	41,52	158,10	23,06	12,60	5,00	4,56
0,1	11,72	6,57	13,13	50,00	7,29	3,98	1,58	1,44
1	3,71	2,08	4,15	15,81	2,31	1,26	0,50	0,46
10	1,17	0,66	1,31	5,00	0,73	0,40	0,16	0,14
100	0,37	0,21	0,42	1,58	0,23	0,13	0,05	0,05
1000	0,12	0,07	0,13	0,50	0,07	0,04	0,02	0,02
5000	0,05	0,03	0,06	0,22	0,03	0,02	0,01	0,01

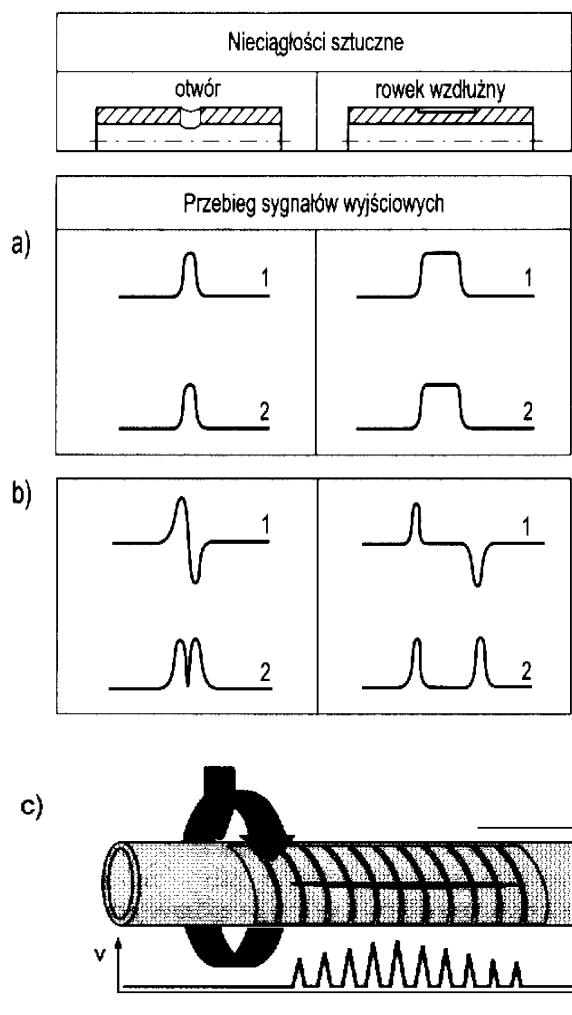


duża częstotliwość  
duża przewodność elektryczna  
duża przenikalność magnetyczna

mała częstotliwość  
mała przewodność elektryczna  
mała przenikalność magnetyczna

Rys. 2.24. Poglądowe przedstawienie wnikania prądów wirowych do obiektów: 1 - zasilanie cewek, 2 - przetwornik wiroprowadzowy, 3 - głębokość wnikania prądów wirowych, wg Anny Lewińskiej - Romickiej

Na rys. 2.25 przedstawiono zmiany amplitudy sygnałów przetworników przelotowych: bezwzględnego (rys. 2.25.a) i różnicowego (rys. 2.25.b), dla nieciągłości punktowej i wzdłużnej oraz przetwornika stykowego wirującego (rys. 2.25.c), dla nieciągłości wzdłużnej.



Rys. 2.25. Zmiany amplitudy sygnałów przetworników przelotowych: a) bezwzględnego dla nieciągłości punktowej i wzdłużnej, b) różnicowego dla nieciągłości punktowej i wzdłużnej oraz c) przetwornika stykowego wirującego dla nieciągłości wzdłużnej  
Reprodukacja na podstawie materiałów firmy INSTITUT DR.Förster