



Wykrywanie nieciągłości materiałów metalowych za pomocą badań nieniszczących

K. Studnik^a, M. Król^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: krzysztof.studnik@gmail.com

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
email: mariusz.król@polsl.pl

Streszczenie: W artykule dokonano przeglądu metod badań nieniszczących stosowanych do wykrywania nieciągłości materiałów metalowych oraz wykorzystywanej aparatury badawczej.

Abstract: This paper presents principles of non-destructive testing methods used to detect discontinuities in metals by using suitable equipment.

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, wizualne, penetracyjne, magnetyczno-proszkowe, ultradźwiękowe, radiograficzne, defektoskopia.

1. WSTĘP

Podczas eksploatacji urządzeń na skutek działania obciążeń i tarcia pomiędzy jego częściami składowymi dochodzi do jego zużycia. Jest to nieodłączny element cyklu życia produktu. Ważnym aspektem podczas oceny stanu elementu urządzenia bądź wyrobu jest wykonanie stosownych badań materiałoznawczych i wytrzymałościowych w celu wykrycia wad materiałowych mogących spowodować uszkodzenia elementu podczas eksploatacji. Do tego celu wykonuje się badania wytrzymałościowe, które pozwalają na określenie m. in. rozkładu naprężeń wewnątrz badanego elementu, jego wytrzymałości przy ściskaniu lub rozciąganiu, wytrzymałości zmęczeniowej czy twardości oraz badania materiałoznawcze pozwalają na zbadanie struktury materiału, wykrycia wad budowy, oceny jakości powierzchni elementu czy struktury i jakości złączy spawanych. Podstawowym problemem występującym podczas wykonywania badań materiałoznawczych i wytrzymałościowych jest konieczność demontażu elementu urządzenia i przygotowania odpowiednich próbek, najczęściej poprzez pobranie fragmentu elementu przeznaczonego do badania, co zwykle skutkuje jego uszkodzeniem. Powoduje to wzrost kosztów badania i eksploatacji, ponieważ konieczny jest ponowny montaż elementów urządzenia. Na skutek tego wykrywanie wad (pęknięć,

nieciągłości) elementów jest utrudnione, co przekłada się bezpośrednio na bezpieczeństwo eksploatacji urządzenia lub konstrukcji. Dobrym rozwiązaniem tego problemu jest wykonanie badań nieniszczących, które pozwalają na wykrycie nieciągłości materiału zarówno na jego powierzchni, jak i w całej jego objętości. Badania te nie wymagają przygotowania odpowiednich próbek, dzięki czemu mogą być stosowane w warunkach eksploatacyjnych, bez konieczności demontażu urządzenia.

W niniejszej publikacji przedstawiono najczęściej stosowane metody badań nieniszczących, opisano ich metodologię, zastosowanie oraz przedstawiono ich zalety i wady.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Badania nieniszczące i ich zastosowanie

Badania nieniszczące to badania, dzięki którym możliwe jest uzyskanie informacji o występujących nieciągłościach materiałowych, zarówno powierzchniowych, takich, jak pęknięcia powierzchniowe, wady kształtu złącza, podtopienia, ubytki spowodowane zużyciem trybologicznym, ubytki korozyjne oraz erozyjne, jak i wewnętrznych, do których zalicza się pęknięcia, ubytki korozyjne, rozwarstwienia czy jamy skurczowe, powstałe w różnych etapach procesu technologicznego lub podczas eksploatacji. Badania nieniszczące nie mają wpływu na ciągłość struktury ani na własności użytkowe materiału, co jest ich podstawową zaletą w porównaniu do badań niszczących. Zastosowanie badań nieniszczących przekłada się bezpośrednio na zwiększenie bezpieczeństwa ludzi, poprzez poprawę niezawodności konstrukcji i elementów maszyn i urządzeń, zmniejszenie kosztów eksploatacji, zwiększenie jakości produktów oraz wydłużenie ich żywotności [1-3].

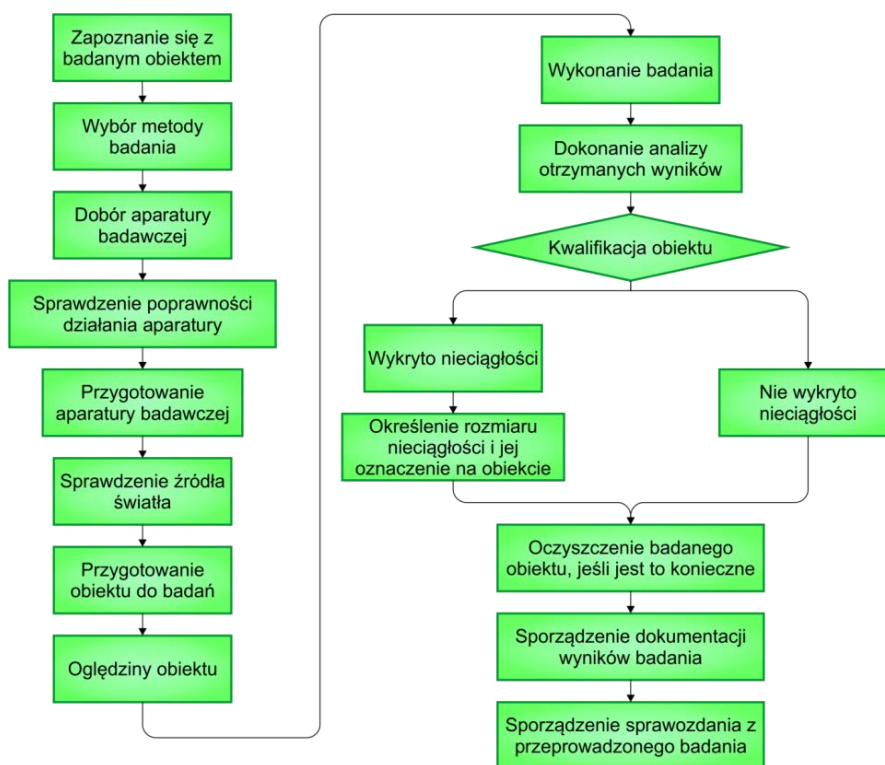
Nieciągłości to defekty ciągłości makro- i mikrostruktury elementu, które mogły powstać na skutek błędnie wykonanego procesu produkcyjnego lub podczas długiej lub nieprawidłowej eksploatacji. Wykrycie wad materiałowych jest kluczowe ze względów bezpieczeństwa podczas użytkowania danej konstrukcji, ponieważ pojawienie się nieciągłości takich, jak pęknięcia, pęcherze czy ubytki korozyjne ma wpływ na jej wytrzymałość. Zlekceważenie takich wad może prowadzić do bezpośredniego zagrożenia zdrowia lub życia użytkowników danego obiektu (np. kotłów, zbiorników, mostów, samolotów, statków, pojazdów szynowych, wyciągów górniczych) oraz strat finansowych [1-5].

Zależnie od materiału i geometrii badanego obiektu oraz oczekiwanej czułości badania stosuje się następujące metody badań nieniszczących [1]:

- badanie wizualne (VT),
- metoda penetracyjna (PT),
- metoda magnetyczno-proszkowa (MT),
- metoda ultradźwiękowa (UT),
- metoda radiograficzna (RT),

Nie istnieje uniwersalna metoda badań nieniszczących, a jej dobór ma duże znaczenie dla wiarygodności badania. Dobór optymalnej metody badawczej jest zależny od cech badanego obiektu, materiału z jakiego jest wykonany, jego geometrii, a także charakteru i rozmiaru nieciągłości, które mają zostać wykryte podczas badania – należy zwrócić uwagę na zdolność wykrywania określonego rodzaju wady za pomocą danej metody, przykładem mogą być pęcherze, które znacznie łatwiej wykryć metodą radiograficzną niż ultradźwiękową. Możliwe jest zastosowanie więcej niż jednej metody badawczej, co pozwoli na zwiększenie wiarygodności otrzymanego wyniku, ale wiąże się to z wyższym kosztem i wydłużonym czasem badania. W niektórych przypadkach zastosowanie danej metody czy urządzenia jest niewskazane, ponieważ może prowadzić do uszkodzenia lub zanieczyszczenia badanego

obiektu, a nawet spowodować zagrożenie dla zdrowia lub życia. Ogólny przebieg badań nieniszczących przedstawiono na rysunku 1 [1, 6].



Rysunek 1. Ogólny przebieg badań nieniszczących [1]

Figure 1. General course of NDT [1]

Podczas wykonywania badań nieniszczących bardzo ważne jest również oszacowanie niepewności badania. W przeciwieństwie do badań pomiarowych, których wynikiem jest jednoznaczna wartość liczbową, w badaniach nieniszczących konieczna jest analiza i interpretacja otrzymanego wyniku, co wiąże się z możliwością popełnienia błędu przez osobę wykonującą badanie. Błędna interpretacja otrzymanego wyniku może znacząco wpłynąć na ocenę stanu badanego elementu. Do głównych przyczyn niepewności badań nieniszczących zalicza się [1]:

- sposób przygotowania badanego elementu,
- dobór i sprawność aparatury badawczej,
- dobór parametrów badania,
- czynnik ludzki.

2.2. Badania wizualne

Badania wizualne to pierwszy etap kontroli jakości produktu. Wstępne oględziny pozwalają na szybkie i tanie wykrycie takich niedoskonałości wyrobu, jak nieprawidłowa geometria badanego obiektu (np. niewłaściwy kształt spoiny) czy nieciągłości powierzchniowe, powstałe podczas procesu produkcji. Nieciągłości te mogą mieć postać m. in. pęknięć, porów, zawałców, podtopień spoiny, przyklejeń oraz kraterów. Możliwe jest również wykrycie wad eksploatacyjnych spowodowanych zużyciem korozyjnym, erozyjnym i zmęczeniowym. Badania wizualne są najprostszą metodą badań elementów maszyn i urządzeń oraz konstrukcji spawanych. Dla złączy spawanych badania te są obligatoryjne. Badania wizualne polegają na wzrokowej kontroli powierzchni obiektu, wykonaniu

stosownych pomiarów oraz sprawdzeniu poprawności montażu elementów. Badania wizualne mogą być stosowane dla każdego rodzaju materiału. Oględziny badanego obiektu są również nieodłączną częścią badań penetracyjnych i magnetyczno-proszkowych. Metoda wizualna pozwala na wykrywanie pęknięć o szerokości od ok. 0,01 mm, długości od ok. 0,1 mm i głębokości od ok. 0,1 mm. Prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości podczas badań wizualnych zależy od położenia i wymiarów nieciągłości, geometrii badanego obiektu, stanu przygotowania i chropowatości powierzchni, a także od natężenia światła, kierunku padania wiązki światła, odległości obserwacji, doświadczenia osoby wykonującej badanie oraz ostrości wzroku [1, 7-9].

Badania wizualne można podzielić na [1, 9]:

- badania bezpośrednie – badania powierzchni dostępnych bezpośrednio, wykonywane okiem nieuzbrojonym lub przy pomocy lup i mikroskopów,
- badania pośrednie – badania powierzchni niedostępnych bezpośrednio, konieczne jest zastosowanie przyrządów optycznych takich, jak lusterka, endoskopy lub wideoskopy.

Do wykonywania badań wizualnych zastosowanie znajduje specjalistyczna aparatura, dzięki której możliwa jest obserwacja powierzchni niedostępnych bezpośrednio. Podczas badań bezpośrednich wykorzystuje się podstawowe przyrządy pomiarowe takie, jak suwmiarka, spoinomierze, lupy oraz dodatkowe źródła światła [7].

Podczas wykonywania badania pośredniego niezbędne jest zastosowanie przyrządów do zdalnej kontroli wizualnej badanej powierzchni. Do tej grupy urządzeń zalicza się m. in. endoskopy i wideoskopy. Endoskopy pozwalają na transmisję obrazu obserwowanej powierzchni przez zespół soczewek oraz włókien światłowodowych do okularu. Na końcu przewodu endoskopu zamocowana jest sonda wraz z dodatkowym źródłem światła. Wideoskopy z kolei wykorzystują kamerę o wysokiej rozdzielczości do obserwacji powierzchni, a obraz jest wyświetlany na ekranie monitora i może być zapisany w postaci cyfrowej. Końcówka sondy w powyższych urządzeniach najczęściej jest sterowana za pomocą cięgieł lub układu hydraulicznego, dzięki czemu możliwe jest łatwe dotarcie sondy do trudno dostępnych miejsc [1, 9].

Tablica 1. Zalety i wady badań wizualnych [1, 9]

Table 1. Advantages and disadvantages of visual testing [1, 9]

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> • prostota procesu, • szybkość wykonania badania, • niski koszt badania, • możliwość stosowania dla każdego rodzaju materiału. 	<ul style="list-style-type: none"> • wykrywanie wyłącznie wad powierzchniowych, • trudność interpretacji zaobserwowanych niezgodności, • konieczność dokładnego przygotowania badanej powierzchni, • duży wpływ otoczenia na wynik badania.

Bardzo istotne jest odpowiednie oświetlenie na stanowisku pracy. Podczas wykonywania badań wizualnych, zgodnie z normą PN-EN ISO 17637:2011, obiekt powinien być oświetlony światłem białym, a natężenie oświetlenia powinno wynosić minimum 350 lx, zaleca się jednak natężenie przekraczające 500 lx. Wartość natężenia oświetlenia powinna zostać zmierzona przed badaniem za pomocą luksomierza oraz zamieszczona w protokole badania. Kąt padania światła na powierzchnię badanego obiektu również ma wpływ na zdolność

wykrycia wad. Badanie jest najdokładniejsze, jeśli kąt padania wiązki światła mieści się w przedziale 45-85° do powierzchni, a kąt widzenia wynosi co najmniej 30° [1, 7, 9, 10].

Dokumentacja nieciągłości obiektu zwykle ogranicza się jedynie do szkiców, na których przedstawione jest umiejscowienie oraz wymiary wykrytych nieciągłości. Jeśli wymagana jest dokładniejsza dokumentacja, może być wykonana w formie fotografii lub rejestracji cyfrowej. Po wykonaniu badania i przeanalizowaniu otrzymanych wyników sporządzany jest protokół badania, w którym zawarte są wszelkie informacje dotyczące przebiegu, zakresu i parametrów badania, wymagania, oczekiwany poziom jakości oraz wynik badania. W przypadku wykrycia wad konieczne jest również ich udokumentowanie w protokole. Najważniejsze zalety i wady badań wizualnych przedstawiono w tablicy 1 [1, 7].

2.3. Badania penetracyjne

Badania penetracyjne to jedna z powierzchniowych metod badań nieniszczących i może być stosowana dla wielu rodzajów materiałów. Metoda penetracyjna wykorzystuje zjawisko włoskowatości (kapilarności), które polega na wnikaniu cieczy do przestrzeni o małych wymiarach i unoszeniu się w nich wbrew sile grawitacji. Kluczem do optymalnego wykorzystania tego zjawiska jest wybór odpowiedniej cieczy, którą w tej metodzie stanowi penetrant [5].

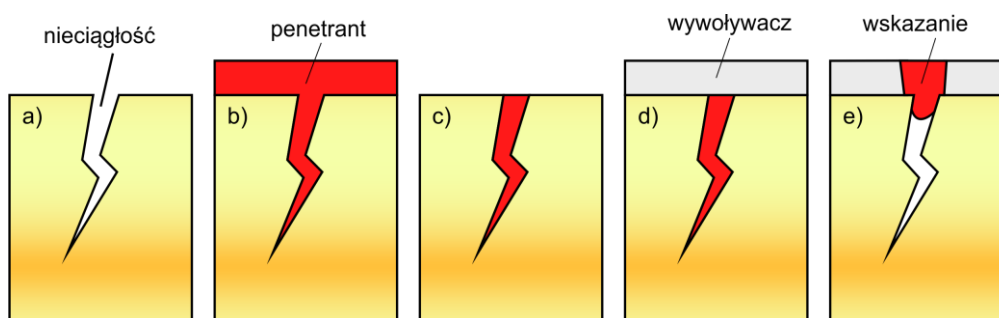
Badanie metodą penetracyjną polega na pokryciu badanej powierzchni penetrantem, odczekaniu aż nieciągłości powierzchniowe zostaną nasycone, oczyszczeniu powierzchni z nadmiaru penetranta oraz pokryciu powierzchni cieczą o wysokiej chłonności, zwanej wywoływaczem. Wysoka chłonność wywoływacza powoduje stopniowe „wyciąganie” penetranta z nieciągłości powierzchniowych. Różne barwy wywoływacza i penetranta powodują zabarwienie warstwy wywoływacza w miejscach, skąd penetrant został wyciągnięty, czyli wskazane zostaje miejsce wystąpienia nieciągłości powierzchniowej. Ogólną zasadę działania metody penetracyjnej przedstawiono na rysunku 2 [1, 5].

Badania penetracyjne stosowane są do wykrywania nieciągłości materiałów metalowych, ceramicznych, kompozytowych i tworzyw sztucznych. Warunkiem jest porowatość materiału, która nie może być zbyt duża. Jeśli powierzchnia badanego obiektu jest zbyt porowata, może to spowodować występowanie fałszywych wskazań w tym obszarze. Należy również zwrócić uwagę na ryzyko rozpuszczenia niektórych materiałów kompozytowych i tworzyw sztucznych przez środki chemiczne stosowane podczas badania. Metoda penetracyjna pozwala na wykrywanie nieciągłości powierzchniowych otwartych bez względu na ich orientację względem powierzchni. Wykrywane są m. in. takie nieciągłości, jak pęknięcia na gorąco, pęknięcia na zimno, pęknięcia spowodowane zużyciem zmęczeniowym, przyklejenia, braki przetopu złączy spawanych, pęknięcia hartownicze, zawalcowania oraz zakucia, a także wżery korozyjne i erozyjne. Bardzo ważne dla dokładności otrzymanych wyników jest, aby badania penetracyjne wykonywać przed badaniem innymi metodami (nie dotyczy metody wizualnej). Na przykład podczas wykonania badania metodą magnetyczno-proszkową nieciągłości powierzchniowe mogłyby zostać zatkane przez zawiesiny proszkowe, przez co niemożliwe byłoby wnikanie do nich penetranta i ich wykrycie podczas badań penetracyjnych. Przed wykonaniem badania konieczne jest dokładne oczyszczenie i odtłuszczenie badanej powierzchni. Zasady wykonywania badań penetracyjnych opisuje norma PN-EN ISO 3452-1:2013-08 – „Badania nieniszczące - Badania penetracyjne - Część 1: Zasady ogólne” [1, 5, 11].

Wśród preparatów stosowanych do badań penetracyjnych wyróżnia się penetranty, wywoływacze i zmywacze. Penetranty można podzielić ze względu na rodzaj barwnika wchodzącego w skład penetranta:

- penetranty barwne – penetranty takie mają zwykle barwę czerwoną, amarantową lub fioletową, których zastosowanie pozwala to na otrzymanie wysokiego kontrastu na białym tle wywoływacza, a obserwacja możliwa jest w świetle białym,
- penetranty fluorescencyjne – zawierają one luminofor, który pod wpływem działania promieniowania UV emituje promieniowanie widzialne,
- penetranty fluorescencyjno-barwne – penetranty tego typu pozwalają na obserwację zarówno w świetle białym, jak i ultrafioletowym.

Penetranty mogą być наносzone poprzez rozpylanie aerozolu, malowanie powierzchni pędzlem, polewanie lub zanurzanie. Zależnie od materiału badanego i rodzaju badanego elementu czas wnikania penetranta wynosi zwykle od 5 do 30 minut, choć w przypadku niektórych materiałów konstrukcyjnych takich, jak stopy na bazie niklu, czas wnikania może się wydłużyć nawet do 240 minut [1, 5, 11].



Rysunek 2. Zasada działania metody penetracyjnej: a) nieciągłość powierzchniowa przed badaniem, b) pokrycie powierzchni penetrantem, c) oczyszczenie powierzchni z nadmiaru penetranta, d) pokrycie powierzchni wywoływaczem, e) wyciągnięcie penetranta z nieciągłości [1, 5]

Figure 2. Penetrant testing principles: a) surface discontinuity before testing, b) penetrant application to the surface, c) excess penetrant removal, d) developer application, e) drawing penetrant from surface discontinuity [1, 5]

Wywoływacz jest materiałem silnie chłoniącym penetrant z zagłębień występujących na powierzchni materiału. Jest on наносzony po wyczyszczeniu badanej powierzchni z penetranta poprzez napylenie, zanurzanie, spryskiwanie lub zalewanie. Wywoływacz może mieć postać suchego proszku lub cieczy, która schnie po pokryciu powierzchni i przekształca się w proszek. Najczęściej występuje w kolorze białym, co zapewnia kontrast pomiędzy wywoływaczem, a penetrantem [4, 5].

Do wyczyszczenia powierzchni oraz usunięcia nadmiaru penetranta stosuje się środek zwany zmywaczem. Jest to rozpuszczalnik, który umożliwia łatwe usunięcie penetranta z badanej powierzchni, ale nie wnika do szczelin nieciągłości, dzięki czemu nie usuwa z nich penetranta. Zmywacz można stosować także do wyczyszczenia i odfuszczenia badanej powierzchni. Charakteryzuje się dużą szybkością parowania. Penetrant może być również usuwany przy pomocy emulgatora, który umożliwia wyczyszczenie powierzchni wodą. Zmywacz ma zwykle postać cieczy, choć występuje także w formie aerozolu [5, 11].

Przy badaniach penetracyjnych należy również wspomnieć o zagrożeniach związanych ze stosowaniem preparatów do badań. Narażenie na działanie penetrantów, zmywaczy i wywoływaczy może spowodować podrażnienie dróg oddechowych, skóry oraz śluzówki, dlatego też operatorzy powinni stosować środki ochrony osobistej, a pomieszczenia, w których wykonywane są badania, powinny posiadać dostateczną wentylację. Środki te są również łatwopalne oraz szkodliwe dla środowiska, należy więc przestrzegać przepisów związanych ze stosowaniem tego typu materiałów [5].

Podobnie, jak w przypadku badań wizualnych, wykryte wady powinny być udokumentowane w postaci szkicu lub fotografii. Konieczne jest podanie wymiarów i umiejscowienie nieciągłości. Szkic dołączany jest do protokołu badania, który zawiera przebieg i parametry badania oraz analizę otrzymanego wyniku. Najważniejsze zalety i wady badań penetracyjnych przedstawiono w tablicy 2 [1, 5].

Tablica 2. Zalety i wady badań penetracyjnych [1, 5]

Table 2. Advantages and disadvantages of penetrant testing [1, 5]

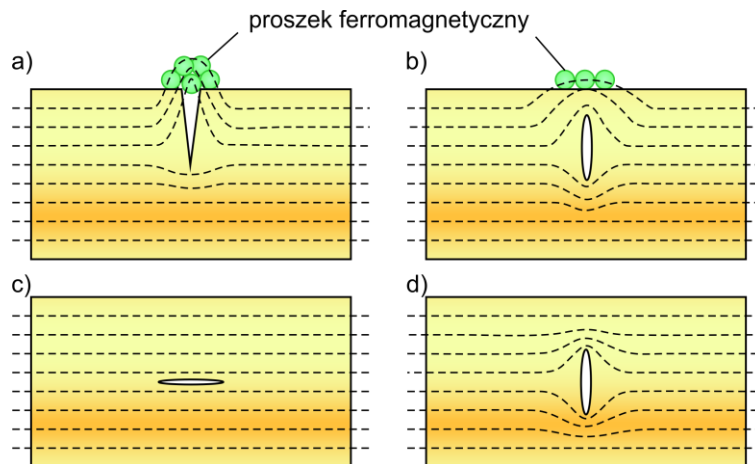
Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> • prostota procesu, • brak konieczności stosowania drogiej aparatury badawczej, • możliwość badania obiektów o skomplikowanym kształcie. 	<ul style="list-style-type: none"> • wykrywanie wyłącznie wad powierzchniowych, • stosunkowo długi czas badania, • wyższy koszt badania, • konieczność dokładnego przygotowania badanej powierzchni, • duży wpływ chropowatości badanej powierzchni na wynik badania, • szkodliwość stosowanych preparatów na zdrowie i środowisko.

2.4. Badania magnetyczno-proszkowe

Badania metodą magnetyczno-proszkową także należą do badań powierzchniowych. Wykorzystuje się w nich zjawisko rozproszenia wzbudzonego pola magnetycznego w miejscu występowania nieciągłości materiału. Wzbudzenie pola magnetycznego możliwe jest tylko w materiałach ferromagnetycznych, zatem niemożliwe jest wykonanie takiego badania dla materiałów niemagnetycznych, jak np. stal austenityczna. Za pomocą badania magnetyczno-proszkowego możliwe jest wykrycie nieciągłości powierzchniowych oraz stosunkowo dużych nieciągłości podpowierzchniowych. W przypadku namagnesowania badanego obiektu prądem przemiennym możliwe jest wykrycie nieciągłości występującej do około 2 mm pod powierzchnią, a w przypadku namagnesowania prądem stałym nawet do 3 mm pod powierzchnią. Metoda magnetyczno-proszkowa wykrywa nieciągłości o długości od około 3 mm, szerokości od 0,001 mm i głębokości 0,1 mm. Wykrywalność wad zwiększa się proporcjonalnie ze wzrostem przenikalności magnetycznej materiału. Wykrywane są takie nieciągłości, jak pęknięcia powierzchniowe, przyklejenia, zawałowania, rozerwania, wtrącenia niemetaliczne, pęcherze oraz wżery korozyjne [1, 6, 7].

Na rysunku 3 przedstawiono zasadę działania metody magnetyczno-proszkowej. Polega ona na odchyleniu linii pola magnetycznego od osi pod wpływem występującej nieciągłości materiału, ze względu na zwiększoną reluktancję magnetyczną w tym obszarze. Jeśli nieciągłość występuje na powierzchni lub na małej głębokości pod powierzchnią, pole magnetyczne przebiega poza badanym materiałem, co powoduje gromadzenie się w tym obszarze proszku ferromagnetycznego oraz wystąpienie wskazania. Najwyższa wykrywalność nieciągłości występuje w przypadku ich prostopadłego ułożenia względem kierunku wzbudzonego pola magnetycznego. Jeśli wada zorientowana jest równolegle do kierunku pola magnetycznego, możliwe jest jej niewykrycie, co w praktyce może przyczynić się do nieprawidłowej oceny stanu badanego elementu. Dlatego też dla uzyskania najwyższej wykrywalności wad pole magnetyczne wzbudza się kilkukrotnie pod innym kątem. Otrzymane wskazania występujących nieciągłości nazywane są defektogramami proszkowymi. Pozwalają one na jakościowe wskazanie wady, ale niemożliwe jest określenie

jej głębokości. Badania magnetyczno-proszkowe stosowane są zarówno podczas procesu produkcji, jak i eksploatacji. Metodą tą badane są m. in. złącza spawane, odlewy, komponenty w przemyśle samochodowym, lotniczym, kolejowym i stoczniowym, koła zębate, osie, wały, przekładnie, sworznie, łańcuchy, haki oraz elementy wyciągów górskich i górniczych [1, 6, 7, 9].



Rysunek 3. Zasada działania metody magnetyczno-proszkowej i wskazania nieciągłości: a) powierzchniowej poprzecznej, b) podpowierzchniowej poprzecznej, c) wewnętrznej podłużnej, d) wewnętrznej poprzecznej [1]

Figure 3. Magnetic particle testing principles and indication of: a) surface transverse discontinuity, b) subsurface transverse discontinuity, c) internal longitudinal discontinuity, d) internal transverse discontinuity [1]

Pole magnetyczne może być wzbudzone poprzez przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego do badanego obiektu, przepływ prądu elektrycznego lub techniki łączące obie te metody. Możliwe jest również wzbudzenie pola magnetycznego miejscowo lub w całej objętości badanego obiektu. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego możliwe jest za pomocą elektromagnesów jarzmowych lub cewek indukcyjnych. Aparaturę stosowaną w badaniach magnetyczno-proszkowych opisuje norma PN-EN ISO 9934-3:2003 – „Badania nieniszczące - Badania magnetyczno-proszkowe - Część 3: Aparatura”. Elektromagnesy jarzmowe zasilane są prądem stałym lub przemiennym. Przyłożone pole magnetyczne przebiega wzdłuż linii prostych, pomiędzy nabiegunkami elektromagnesu, co umożliwia najlepsze wykrywanie wad ułożonych poprzecznie do osi przyłożenia elektromagnesu. Wadą stosowania elektromagnesów jest wzbudzenie pola magnetycznego jedynie miejscowo, przez co badanie dużych obiektów może być czasochłonne. Cewki przelotowe stosowane w badaniach magnetyczno-proszkowych mogą mieć kształt okrągły lub kwadratowy, a także mogą być formowane z przewodów prądowych, co pozwala na ich łatwe dostosowanie do kształtu badanego obiektu. Pole magnetyczne wzbudzone za pomocą cewki przelotowej rozchodzi się podłużnie względem osi cewki, co umożliwia wykrycie wad poprzecznych. Zastosowanie cewki obejmującej uformowanej z przewodu prądowego umożliwia dodatkowo wykrywanie nieciągłości usytuowanych w różnych kierunkach w obiektach o kształcie pierścieniowym [1, 2, 6, 12]. Namagnesowanie obiektu przez przepływ prądu elektrycznego wykonuje się za pomocą miedzianych elektrod. Wzbudzone pole magnetyczne rozchodzi się kołowo względem elektrod, a prostopadle względem kierunku przepływu prądu. Pozwala to na wykrywanie nieciągłości usytuowanych wzdłużnie względem kierunku przyłożenia elektrod. Elektrody umożliwiają badanie obiektów o skomplikowanym kształcie, ale konieczne jest dokładne wyczyszczenie powierzchni w miejscu styku celem zmniejszenia rezystancji. Niedostateczny kontakt elektrody z powierzchnią może powodować przypalenie

badanej powierzchni oraz powstanie iskier. Przepływ prądu powoduje także nagrzewanie się badanego obiektu, przez co nie można stosować tej metody w połączeniu z zawiesinami proszkowymi na bazie oleju, ze względu na możliwość wystąpienia pożaru [1, 6].

Podczas badań magnetyczno-proszkowych możliwe jest wystąpienie wskazań pozornych, które mogą zafałszować wynik badania. Wskazania pozorne mogą być spowodowane nieodpowiednim przygotowaniem badanej powierzchni (powierzchnia powinna być w miarę możliwości równomierna oraz oczyszczona, proszek może osadzać się np. w zadziórach warstwy lakieru), nieodpowiednim wzbudzeniem pola magnetycznego w badanym obiekcie, występowaniem nieciągłości geometrycznych badanego obiektu (karby, szczeliny, zmiany przekroju, gwinty) oraz niejednorodnością struktury, co może skutkować zmienną przenikalnością magnetyczną materiału [1, 6].

Zależnie od zastosowanych preparatów wyróżnia się metodę magnetyczno-proszkową suchą oraz mokrą. W metodzie suchej wykorzystuje się proszki w postaci pylistej. Drobinę magnetyczną zawierają zwykle czyste żelazo, tlenki żelaza (Fe_3O_4 lub Fe_2O_3), ferryty lub stopy niklu. Podczas badań stosuje się proszki fluorescencyjne do obserwacji w świetle ultrafioletowym oraz proszki niefluorescencyjne czarne lub barwne, które nanoszone są zwykle na kontrastujący podkład. Proszki zalecane są zazwyczaj do badania chropowatych powierzchni. Podczas wykonywania badań metodą mokrą stosuje się zawiesiny proszkowe na bazie wody lub oleju. Drobinę magnetyczną mogą być fluorescencyjne lub niefluorescencyjne.

Tablica. 3. Zalety i wady badań magnetyczno-proszkowych [1, 6]

Table 3. Magnetic particle testing advantages and disadvantages [1, 6]

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> • prostota procesu, • duża czułość badania, • stosunkowo krótki czas badania, • możliwość badania całych elementów jednocześnie lub miejscowo, • możliwość stosowania w terenie, • możliwość dostosowania czułości badania, • brak konieczności stosowania drogiej aparatury badawczej. 	<ul style="list-style-type: none"> • wykrywanie wyłącznie wad powierzchniowych i podpowierzchniowych, • możliwość stosowania tylko dla materiałów ferromagnetycznych, • wykrywalność wad zależy od ich usytuowania względem kierunku wzbudzonego pola magnetycznego, • konieczność dokładnego przygotowania badanej powierzchni.

Metoda mokra charakteryzuje się wyższą czułością badania niż metoda sucha. Zawiesiny wodne są tańsze, szybciej ujawniają wskazania, nie są łatwopalne, są mniej szkodliwe dla środowiska i łatwiej je usunąć po zakończeniu badania, ale mogą powodować korozję badanych powierzchni oraz zwarcia elektryczne. Zawiesiny na bazie oleju charakteryzują się dobrym rozpraszaniem drobin magnetycznych i nie powodują korozji ani zwarć elektrycznych, ale ich koszt jest wyższy, są łatwopalne, ujawnienie wskazań następuje wolniej, a także mają negatywny wpływ na środowisko i zdrowie ludzi, ze względu na występujące opary. Podczas badania metodą mokrą zalecane jest w miarę możliwości nachylenie badanej powierzchni, co ułatwia spływanie nadmiaru zawiesiny z badanej powierzchni. Stosowanie zawiesin jest niezalecane w przypadku powierzchni chropowatych z powodu gromadzenia się drobin w porach na powierzchni. Stosowane środki wykrywające muszą być zgodne z normą międzynarodową PN-EN ISO 9934-2:2003 – „Badania nieniszczące - Badania magnetyczno-proszkowe - Część 2: Środki wykrywające” [1, 6, 7, 13].

Podobnie, jak w przypadku badań wizualnych i penetracyjnych, otrzymane wyniki powinny zostać udokumentowane w postaci szkicu lub fotografii. Najważniejsze zalety i wady badań metodą magnetyczno-proszkową przedstawiono w tabelicy 3.

2.5. Badania ultradźwiękowe

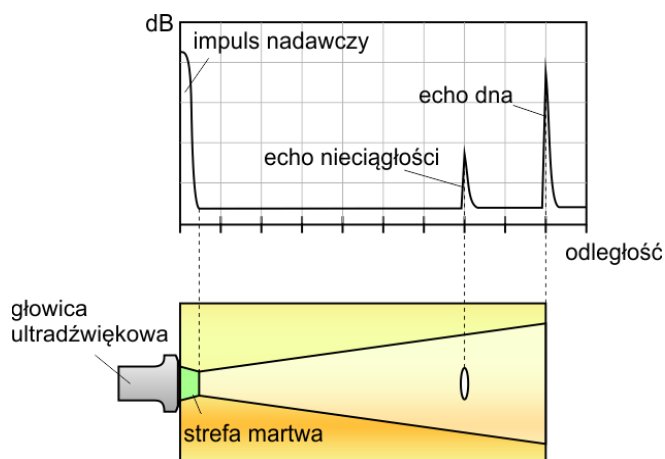
Jedną z najczęściej stosowanych metod badań nieniszczących jest metoda ultradźwiękowa. Zaliczana jest do metod objętościowych, oznacza to, że badania ultradźwiękowe pozwalają na wykrycie wad zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz badanego obiektu. Metoda ta polega na wprowadzeniu do materiału badanego obiektu fal ultradźwiękowych (drgań mechanicznych o częstotliwości większej niż 20 kHz), a następnie rejestracji sygnałów odbitych. Za pomocą tej metody możliwe jest wykrycie nieciągłości oraz określenie ich lokalizacji i wymiarów. Główną zaletą badań ultradźwiękowych jest ich dokładność oraz możliwość badania dużych obiektów. Metoda ultradźwiękowa stosowana jest zarówno podczas kontroli jakości, jak i w badaniach eksploatacyjnych. Jest szeroko stosowana m. in. w badaniach rurociągów, odlewów, odkuwek, części maszyn i urządzeń, wałów, szyn, haków, złączy spawanych i nitowanych oraz zbiorników. Wykrywane są pęknięcia podłużne i poprzeczne, jamy skurczowe, pęcherze, wtrącenia, rozwarstwienia, przyklejenia, braki przetopu, podtopienia spoiny, a także ubytki korozyjne [1, 9, 14].

Metoda ultradźwiękowa opiera się na zjawisku odbicia fali, które zachodzi na granicy ośrodków o różnej impedancji akustycznej, czyli na powierzchni obiektu, nieciągłości lub wtrąceniu innego materiału. Wyróżnia się metodę echa, metodę przepuszczania (cienia) oraz połączenie obu tych metod. Metoda echa polega na rejestrowaniu odbicia wygenerowanej fali, a otrzymane sygnały nazywane są echem. Sygnały przedstawione są w postaci impulsów, których wysokość jest zależna od rozmiaru reflektora (nieciągłości lub powierzchni), a położenie na wykresie od odległości od głowicy, dzięki czemu możliwe jest precyzyjne określenie lokalizacji wykrytej wady. Na osi rzędnych wykresu przedstawiona jest amplituda sygnałów, a na osi odciętych czas przebiegu fali, co w praktyce oznacza odległość od głowicy. Echa przedstawione na wykresie reprezentują reflektory, które znalazły się na drodze rozchodzącej się fali. Podczas badania metodą echa należy pamiętać o występowaniu impulsu nadawczego na początku wykresu. Nie oznacza on nieciągłości, ale powoduje wystąpienie strefy martwej, w której obserwacja nie jest możliwa. Metoda echa charakteryzuje się dużą czułością i możliwością badania dużych elementów oraz wymaga dostępu tylko do jednej powierzchni badanego obiektu. Zasadę działania metody echa przedstawiono na rysunku 4 [1, 14].

Inną metodą badań ultradźwiękowych jest metoda przepuszczania, która wykorzystuje przysłonięcie wiązki fal przez nieciągłość materiału (rys. 5.). Stosowana jest głównie dla badań materiałów charakteryzujących się silnym tłumieniem fal ultradźwiękowych i wymaga zastosowania dwóch głowic oraz dostępu do dwóch przeciwległych powierzchni badanego obiektu. Pozwala również na wykrycie wad występujących blisko powierzchni ze względu na brak impulsu nadawczego. Do jednej z powierzchni przykładana jest głowica nadawcza, a po przeciwległej stronie głowica odbiorcza. Zarejestrowany sygnał przedstawiony jest na wykresie jako impuls fali przechodzącej przez obiekt. Im mniejszy jest zarejestrowany impuls, tym większa nieciągłość występuje w materiale. Położenie i rozmiar nieciągłości ma wpływ na stopień osłabienia energii fali. Za pomocą metody przepuszczania niemożliwe jest określenie lokalizacji występowania nieciągłości. Ze względu na konieczność stosowania dwóch głowic i dostępu do przeciwległych powierzchni obiektu, metoda ta stosowana jest przede wszystkim podczas badań zautomatyzowanych [1, 15].

Obie metody mogą zostać łączone podczas badania, jak ma to miejsce w przypadku metody TOFD (ang. time-of-flight diffraction). Opiera się ona na ugięciu i rozpraszaniu fal na

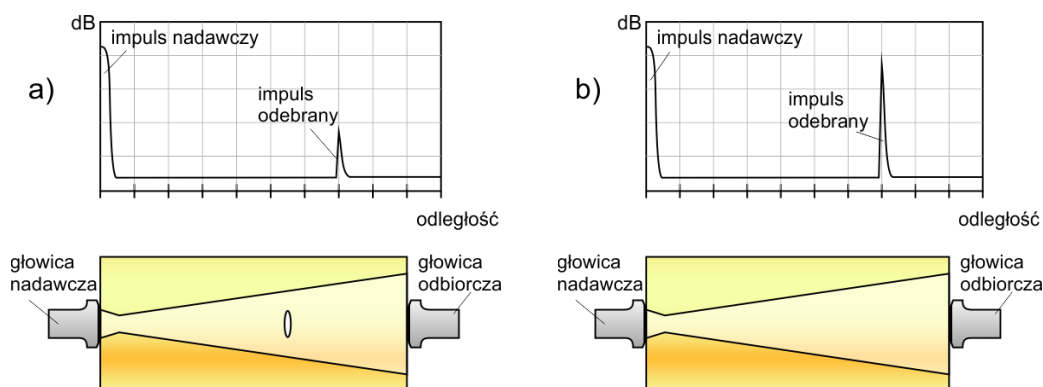
krawędziach usytuowanych prostopadle do kierunku ich przebiegu. Możliwe jest również zastosowanie różnych rodzajów fal zależnie od zastosowanej głowicy. Najczęściej stosowane są fale podłużne, przy których cząsteczki drgają zgodnie z kierunkiem propagacji fali. Innym rodzajem są fale poprzeczne, w których cząstki drgają prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali. Wykorzystuje się również fale powierzchniowe, które rozchodzą się na swobodnej powierzchni ciała stałego, a cząstki drgają po elipsie [1, 14, 15].



Rysunek 4. Przebieg fali ultradźwiękowej oraz sygnały przedstawione na ekranie defektoskopu w metodzie echa [1]

Figure 4. Ultrasonic wave propagation and signals represented on ultrasonic flaw detector screen in reflection method [1]

Podstawowym przyrządem stosowanym podczas wykonywania badań ultradźwiękowych jest defektoskop ultradźwiękowy. Można wyróżnić defektoskopy analogowe wykorzystujące lampę oscyloskopową, które obecnie są stosowane coraz rzadziej, oraz defektoskopy cyfrowe, w których sygnały przetwarzane są na postać cyfrowy. Defektoskopy tego typu posiadają często dodatkowe możliwości, jak np. możliwość zapisu parametrów badania oraz zarejestrowanych wad, nanoszenia unormowanych wykresów DGS (ang. Distance, Gain, Size) lub DAC (ang. Distance Amplitude Correction) służących do określenia rozmiarów nieciągłości [9].



Rysunek 5. Przebieg fali ultradźwiękowej oraz sygnały przedstawione na ekranie defektoskopu w metodzie przepuszczania w przypadku obiektu: a) z nieciągłością wewnętrzną, b) bez nieciągłości [1]

Figure 5. Ultrasonic wave propagation and signals represented on ultrasonic flaw detector screen in attenuation method in case of: a) internal discontinuity, b) no discontinuity [1]

Istotnym elementem aparatury do badań ultradźwiękowych są głowice ultradźwiękowe. Wśród głowic można wyróżnić głowice pojedyncze, podwójne oraz wieloprzetwornikowe. Głowice pojedyncze mogą jednocześnie stanowić źródło i odbiornik fal ultradźwiękowych (metoda echa) lub przy zastosowaniu dwóch głowic jedna z nich może być nadajnikiem, a druga odbiornikiem (metoda przepuszczania). Głowice pojedyncze można podzielić na głowice normalne, skośne oraz powierzchniowe. Głowice normalne wytwarzają fale podłużne. Głowice skośne posiadają wbudowany klin, który powoduje transformację fal na granicy ośrodków na fale poprzeczne i wprowadzana fala ukierunkowana jest pod kątem względem badanej powierzchni (zwykle 45°, 60° lub 70°). Głowice powierzchniowe są zbudowane podobnie do głowic skośnych, ale kąt padania fal podłużnych jest jeszcze większy, dzięki czemu większość fal przebiega blisko powierzchni obiektu. Podczas badania głowicą pojedynczą należy pamiętać o występującej strefie martwej blisko czoła głowicy, co uniemożliwia wykrycie wady w tym obszarze. Głowice podwójne posiadają dwa przetworniki, z których jeden stanowi źródło fal ultradźwiękowych podłużnych, a drugi ich odbiornik. Mogą być wykorzystywane wyłącznie w metodzie echa. Dzięki zastosowaniu dwóch przetworników wyeliminowana jest strefa martwa, co pozwala także na wykrywanie nieciągłości położonych blisko powierzchni. Głowice wieloprzetwornikowe zbudowane są z więcej niż dwóch przetworników, przez co możliwe jest równoczesne wysyłanie fal ultradźwiękowych pod różnym kątem wewnątrz materiału. Zwiększa to znacznie prawdopodobieństwo wykrycia nieciągłości [1, 14].

Podczas badań ultradźwiękowych konieczne jest wyskalowanie defektoskopu za pomocą znormalizowanych wzorców. Najczęściej stosowane są wzorce typu W1 i W2. Wymagania dotyczące wymiarów i wykonania wzorca opisuje norma PN-EN ISO 2400:2013-03 – „Badania nieniszczące – Badania ultradźwiękowe – Opis wzorca Nr 1”. Wzorzec W2 z kolei ze względu na swoją geometrię znajduje zastosowanie wyłącznie z głowicami skośnymi, a wymagania dotyczące wzorca opisuje norma PN-EN 27963:1993 – „Połączenia spawane stali – Wzorzec kontrolny nr 2 do ultradźwiękowych badań stali”. Wzorce te mogą być wykorzystywane do kontroli poprawności działania aparatury, skalowania zakresu obserwacji i podstawy czasu oraz wyznaczania parametrów głowicy takich, jak rzeczywisty środek głowicy oraz kąt padania fal ultradźwiękowych [1].

W celu zapewnienia sprzężenia akustycznego pomiędzy badanym obiektem i głowicą ultradźwiękową stosuje się środki sprzęgające. Najczęściej mają postać gęstych cieczy, są to m. in. oleje maszynowe lub spożywcze, kleje do tapet, smary, wazelina, kremy silikonowe, żywice epoksydowe, a nawet miód pszczeli [1].

Tablica 4. Zalety i wady badań ultradźwiękowych [1, 14]

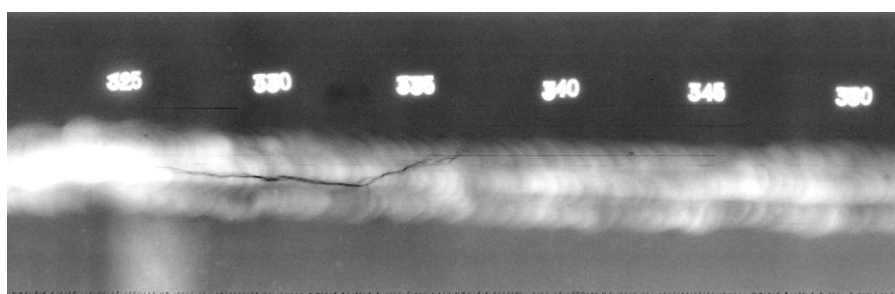
Table 4. Ultrasonic testing advantages and disadvantages [1, 14]

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> • możliwość wykrywania wad w całej objętości badanego obiektu, • duża czułość badania, • możliwość badania całych elementów jednocześnie lub miejscowo, • możliwość dokładnej lokalizacji i rozmiaru nieciągłości, • możliwość pomiaru grubości obiektu. 	<ul style="list-style-type: none"> • skomplikowany proces badania, • wykrywalność wad zależnie od ich usytuowania względem kierunku przebiegu fal ultradźwiękowych, • konieczność stosowania drogiej aparatury.

Przed badaniem ultradźwiękowym konieczne jest przygotowanie powierzchni poprzez zapewnienie ciągłego sprzężenia akustycznego na powierzchni badanego obiektu. Należy również wyznaczyć straty przejścia fal ultradźwiękowych, co spowodowane jest ich tłumieniem. Straty zwiększają się wraz ze wzrostem odległości przebytej przez fale i zachodzą na granicach ziarn i drobnych wydzieleniach oraz powierzchniach styku badanego materiału z głowicą ultradźwiękową. W przypadku wykrycia wad możliwe jest dokładne ich zlokalizowanie oraz określenie ich wymiarów. Informacje te powinny zostać zawarte w dokumentacji dołączonej do protokołu badania. Najważniejsze zalety i wady badań ultradźwiękowych przedstawiono w tablicy 4.

2.6. Badania radiograficzne

Kolejną metodą badań objętościowych jest metoda radiograficzna. Dzięki niej możliwe jest wykrywanie nieciągłości zarówno powierzchniowych, jak i wewnętrznych. Polega ona na naświetlaniu badanego obiektu promieniowaniem rentgenowskim X lub promieniowaniem γ . Promieniowanie przenika przez materiał badanego obiektu, ale ze względu na występowanie zjawisk interferencji oraz dyfrakcji po przejściu różni się ono pod względem intensywności i jednorodności rozkładu. Promieniowanie wyjściowe rejestrowane jest w postaci radiogramów (rys. 6.). Na podstawie zróżnicowanego zaciemnienia obrazu na radiogramie możliwe jest wykrycie nieciągłości – silniejsze zaciemnienie spowodowane jest ubytkiem materiału. Podczas wykonywania badań metodą radiograficzną duży wpływ na wykrywalność nieciągłości płaskich ma kierunek rozchodzenia się promieniowania. Wady usytuowane prostopadle do kierunku napromieniowania obiektu są trudne do wykrycia. Z tego powodu konieczne może być konieczne wielokrotne napromieniowanie badanego obiektu. Badania radiograficzne charakteryzują się dużą wiarygodnością oraz wysoką wykrywalnością wad i stosowane są głównie podczas kontroli konstrukcji, rurociągów, odlewów, złączy spawanych oraz podzespołów statków i samolotów. Za pomocą badań radiograficznych możliwe jest badanie praktycznie wszystkich rodzajów materiałów – metali i ich stopów, tworzyw sztucznych, ceramiki oraz materiałów organicznych. Metoda radiograficzna jest metodą stosunkowo drogą, ze względu na konieczność stosowania skomplikowanej aparatury i materiałów eksploatacyjnych, a wykonywanie badań jest pracochłonne. Zasadę działania badań radiograficznych przedstawiono na rysunku 7 [2, 7, 16, 17].



Rysunek 6. Przykładowy radiogram złącza spawanego [18]

Figure 6. Example of weld joint radiograph [18]

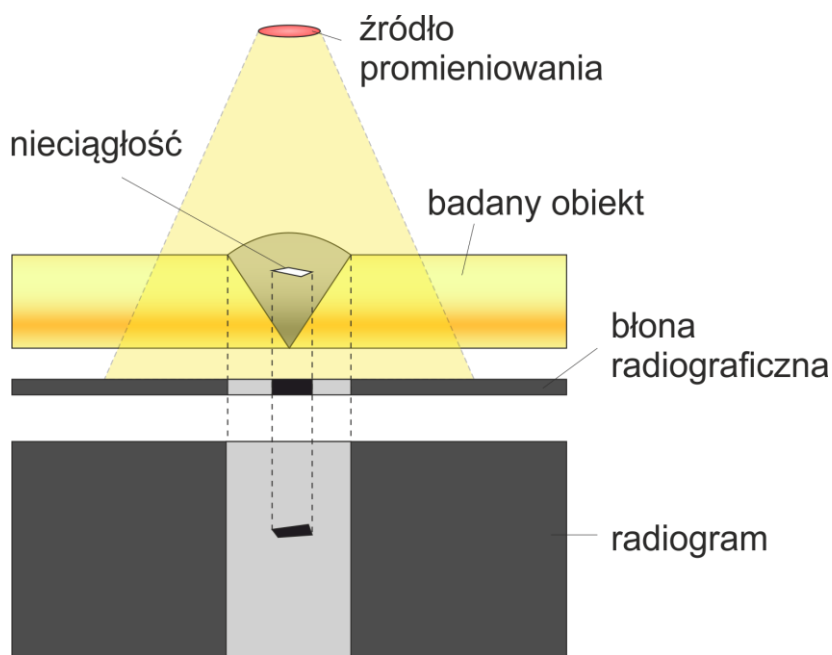
Źródłem promieniowania X w metodzie radiograficznej są lampy rentgenowskie, a źródłem promieniowania γ są izotopy promieniotwórcze. Aparaty rentgenowskie emitują promieniowanie tylko podczas ich pracy, co jest ich podstawową zaletą względem izotopów promieniotwórczych, które emitują promieniowanie w sposób ciągły, z kolei aparaty gammagraficzne wykorzystujące izotopy nie wymagają dostępu do źródła zasilania. Ze względu na występowanie promieniowania jest to metoda niebezpieczna dla operatorów oraz

osób postronnych, dlatego niezbędne jest przestrzeganie przepisów związanych z ochroną radiologiczną i przechowywaniem aparatury [1, 16].

Zaletą metody radiograficznej jest trwałość otrzymanego obrazu, dzięki czemu możliwe jest jego późniejsze analizowanie. Obraz może być rejestrowany za pomocą błony radiograficznej w postaci kliszy lub w postaci cyfrowej przy wykorzystaniu luminoforowej płyty obrazowej. Obrazy zarejestrowane w postaci cyfrowej odznaczają się lepszą jakością oraz możliwością późniejszej obróbki, ale wymagają zastosowania drogiej aparatury badawczej. Płyty obrazowe mogą być wykorzystywane wielokrotnie, co przekłada się na tańszą eksploatację w porównaniu z wykorzystaniem jednorazowych błon radiograficznych. Stosowane są również systemy radioskopii czasu rzeczywistego, które zbudowane są z aparatu rentgenowskiego, manipulatora pozwalającego na przemieszczanie badanego obiektu, kabiny ekspozycyjnej, kamery oraz systemu komputerowego. Dzięki zastosowaniu takiej aparatury możliwa jest obserwacja badanego obiektu w czasie rzeczywistym, obróbka obrazu, a nawet wykonanie pomiarów wykrytych nieciągłości [1, 17].

Podczas wykonywania badań radiograficznych jakość obrazu może być kontrolowana za pomocą znormalizowanych wskaźników jakości obrazu w postaci wskaźników pręcikowych, schodkowo-otworowych oraz pręcikowych typu duplex. Wskaźniki pozwalają na określenie minimalnego rozmiaru szczegółu, który jest widoczny na otrzymanym obrazie. Jakość obrazu może być zapisywana w postaci liczbowej i przedstawiona w protokole badania. Wskaźniki jakości obrazu umieszczone są na obiekcie w trakcie badania, dzięki czemu poziom jakości jest zarejestrowany dla danego badania [1].

Powierzchnia badanego obiektu musi zostać oczyszczona z odprysków, nadlewów oraz resztek masy formierskiej. Zależnie od rodzaju i geometrii obiektu konieczny jest dobór źródła promieniowania, sposobu naświetlania i czasu ekspozycji. Wynik badania powinien zostać udokumentowany w postaci protokołu badania. Zalety i wady metody radiograficznej przedstawiono w tabelicy 5 [17].



Rysunek 7. Zasada działania metody radiograficznej - badanie złącza spawanego [19]

Figure 7. Radiographic testing principles – weld joint testing [19]

Tablica. 5. Zalety i wady badań radiograficznych [16, 17, 20]

Table 5. Radiographic testing advantages and disadvantages [16, 17, 20]

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> • możliwość wykrywania wad w całej objętości badanego obiektu, • możliwość stosowania dla każdego rodzaju materiału, • możliwość badania obiektów o skomplikowanych kształtach, • możliwość dokładnego określenia rozmiaru nieciągłości, • metoda bezdotykowa. 	<ul style="list-style-type: none"> • wykrywalność wad zależnie od ich usytuowania względem kierunku promieniowania, • wysoki koszt aparatury, • skomplikowany proces badania, • pracochłonność procesu, • konieczność dostępu do dwóch przeciwległych powierzchni, • zagrożenie związane z promieniowaniem.

3. PODSUMOWANIE

W celu wydłużenia cyklu życia produktu konieczne jest jego systematyczne badanie i stwierdzenie ewentualnych wad i nieciągłości, które mogą powstać zarówno podczas procesu produkcji, jak i w fazie eksploatacji. Ich niewykrycie może powodować uszkodzenie lub nawet zniszczenie elementu. Badania nieniszczące pozwalają na wykrywanie nieciągłości bez wpływu na strukturę i własności badanego obiektu oraz nie wymagają przygotowania próbek badawczych, co przekłada się na szybkość i stosunkowo niski koszt badania. Badania te stosowane są w fazie kontroli jakości oraz podczas badań eksploatacyjnych w wielu dziedzinach przemysłu, m. in. w motoryzacji, budownictwie, transporcie, przemyśle lotniczym, spawalnictwie, transporcie linowym i rurociągowym, górnictwie oraz przemyśle spożywczym.

Metody badawcze nie są uniwersalne i zależnie od cech badanego obiektu i charakteru wykrywanych nieciągłości konieczny jest dobór optymalnej metody. W celu zwiększenia wykrywalności wad możliwe jest zastosowanie różnych metod lub wykonanie badania wielokrotnie z zastosowaniem różnych parametrów. Podczas wykonywania badań nieniszczących należy pamiętać o możliwości wystąpienia wskazań pozornych, które mogą zostać błędnie zinterpretowane. Istotne jest doświadczenie osoby wykonującej badanie oraz posiadanie odpowiednich kwalifikacji, potwierdzone przez jednostki certyfikujące.

LITERATURA

1. A. Lewińska-Romicka: Badania nieniszczące: Podstawy defektoskopii, WNT, Warszawa 2001.
2. J. Marciniak: Metody badań metali i stopów. Tom 3: Badania składu chemicznego, rentgenografia strukturalna, mikroanaliza rentgenowska, badania defektoskopowe, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1986.
3. Z. Pawłowski: Badania nieniszczące: Poradnik, Wydawnictwo SIMP, Warszawa 1984.
4. J. Deputat, S. Mackiewicz, J. Szelażek: Problemy i techniki nieniszczących badań materiałów, Biuro Gamma, Warszawa 2007.
5. J. Czuchryj, S. Sikora: Badania penetracyjne połączeń spawanych, odlewów i odkuwek, Wydawnictwo KaBe, Krosno 2008.
6. A. Stryk: Defektoskopia magnetyczno-proszkowa: Materiały szkoleniowe, Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, Gliwice 1982.

7. K. Ferenc, J. Ferenc: Konstrukcje spawane. Połączenia, WNT, Warszawa 2006.
8. J. Hlebowicz: Badania wizualne urządzeń technicznych: Poradnik, Biuro Gamma, Warszawa 2002
9. J. Pacyna: Metaloznawstwo. Wybrane zagadnienia, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.
10. PN-EN ISO 17637:2011, Badania nieniszczące złączy spawanych - Badania wizualne złączy spawanych.
11. PN-EN ISO 3452-1:2013-08, Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne.
12. PN-EN ISO 9934-3:2003, Badania nieniszczące - Badania magnetyczno-proszkowe - Część 3: Aparatura.
13. PN-EN ISO 9934-2:2003, Badania nieniszczące - Badania magnetyczno-proszkowe - Część 2: Środki wykrywające.
14. J. Deputat: Badania ultradźwiękowe: Podstawy, Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica, Gliwice 1979.
15. J. Wilczarska: Zastosowanie metod ultradźwiękowych w procesie regeneracji części maszyn, Inż. Ap. Chem. 2014, 53, 2, 125-126.
16. D. Senczyk: Radiografia przemysłowa: podstawy fizyczne, Biuro Gamma, Warszawa 2005.
17. G. Jezierski: Radiografia przemysłowa, WNT, Warszawa 1993.
18. Strona internetowa: <http://www.sentinelld.co.nz> – dostęp 16.12.2014 r.
19. Strona internetowa: <http://www.globalspec.com> – dostęp 07.12.2014 r.
20. Strona internetowa: <https://www.nde-ed.org> – dostęp 09.12.2014 r.