

Łukasz Rawicki^{1*}, Karol Kaczmarek¹, Paweł Irek¹, Grzegorz Hottowy², Jacek Ślania¹¹Instytut Spawalnictwa w Gliwicach²Przedsiębiorstwo „Ekstplast” Sp. z o.o. w Gliwicach

Badania ultradźwiękowe szyn kolejowych

Ultrasonic testing of the rails

ABSTRACT

Tests carried out during production and exploitation are to give an answer about the correctness of made products such as rails. Visual and ultrasonic examination are performed. Visual examinations are basic non-destructive examinations in rails diagnostics. In the rails catalog, defects of such damage like cracks were classified. You can find there information about the location, position or causes of defects in the rails. Detection of defects in rails is one of the first applications of ultrasonic testing. The aim of the study is to detect defects occurring in the volume of the material and evaluation of their size. Examination of rails mounted on the track causes the introduction of ultrasonic waves from the surface of the head through the coupling liquid layer with the surface of the test. Access from the surface of footer is impossible and no detectable cracks in the footer can be detected. Application in performing in the field of ultrasonic testing include echo technique, tandem technique or modern ultrasonic technique Phased-Array.

Keywords: Rails, ultrasonic testing, echo technique, tandem technique, Phased Array techniques

STRESZCZENIE

Badania wykonywane w trakcie produkcji i eksploatacji mają dać odpowiedź o prawidłowości wykonania wyrobów jakimi są szyny kolejowe. Wykonywane są m.in. badania wizualne i ultradźwiękowe. Badania wizualne stanowią podstawowe badania nieniszczące w diagnostyce szyn kolejowych. W katalogu szyn dokonano klasyfikacji wad takich uszkodzeń jak np. pęknięcia. Odnaleźć tam można informacje dotyczące lokalizacji, położenia czy przyczyn powstawania wad w szynach. Jednym z pierwszych zastosowań badań ultradźwiękowych jest wykrywanie wad w szynach. Celem badania jest wykrycie wad występujących w objętości materiału oraz oceny ich wielkości. Badanie szyn zamocowanych na torze powoduje wprowadzanie fal ultradźwiękowych z powierzchni główki przez warstwę cieczy sprzęgającej z powierzchnią badania. Niemożliwy jest dostęp z powierzchni stopki i nie można wykryć rozwijających się pęknięć eksploatacyjnych w stopce. Zastosowanie przy wykonywaniu badań ultradźwiękowych znajdują między innymi technika echa, technika tandem czy nowoczesna technika ultradźwiękowa Phased-Array.

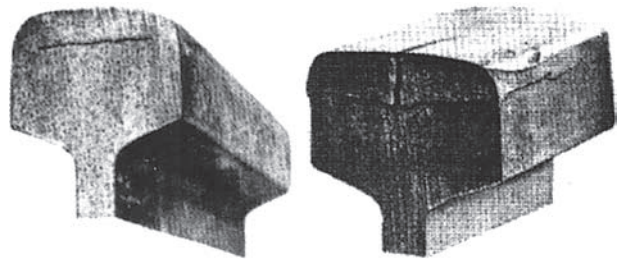
Słowa kluczowe: szyny kolejowe, badania ultradźwiękowe, technika echa, technika tandem, technika Phased Array

Wady w szynach wykrywane są na początku przy pomocy badań wizualnych. Do tego celu zastosowanie ma m.in. katalog szyn, w którym dokonano systemu klasyfikacji pod kątem wad dotyczących złamań, pęknięć i uszkodzeń. Zamieszczone są informacje dotyczące położenia, wyglądu oraz przyczyn powstawania. W katalogu podano również metody wykrywania wad w szynach, jak i zalecenia dotyczące postępowania z szynami, w których wykryto wady [1].

Bez względu na zasady funkcjonowania każdej z kolei, utrzymanie dróg kolejowych wymagać będzie zawsze usuwania pewnej części szyn z powodu ich pęknięć lub zniszczeń powstałych w procesie produkcyjnym lub powstających w eksploatacji. Ważne jest więc śledzenie zachowania się szyn w torze, dzięki czemu zarówno użytkownicy, jak i producenci mogą skupić swoje wysiłki na podnoszeniu jakości i jednocześnie poprawiać warunki ich eksploatacji [1]. Katalog wad szyn podaje możliwości wykrycia wad w szynach przy pomocy metody wizualnej, dającej możliwość wykrycia oraz obserwacji uszkodzeń znajdujących się na powierzchni szyny oraz monitorowania i rozwoju wad. W katalogu podane są również sposoby wykrywania oraz zalecenia dotyczące wykrytej wady szyny. Na rys.1 pokazano przykład pęknięcia poziomego sklasyfikowanego w katalogu wad szyn.

Pęknięcie poziome charakteryzuje się stopniowym oddzieleniem górnej części główki szyny, pęknięcie rozpoczyna się wewnątrz główki szyny i postępuje równoległe do powierzchni toczonej, pęknięcie pojawia się na powierzchni główki, czasami towarzyszy mu pęknięcie pionowe, może

występować łącznie z wykruszeniami końców szyn i zazwyczaj obserwuje się poszerzenie powierzchni toczonej. W późniejszym stadium może nastąpić oddzielenie fragmentu metalu, oddzielenie takie traktuje się jako złamanie, gdy ubytek na głębokości materiału przekroczy 10 mm i dł. 50 mm. Sposoby wykrywania to m.in. badanie wizualne, badanie młotkiem, badania ultradźwiękowe [1].



Rys. 1. Pęknięcie poziome (końców szyn) 112. Wada powstała podczas produkcji [1].

Fig. 1. Horizontal crack (the ends of the rails) 112. The defect created during the production [1].

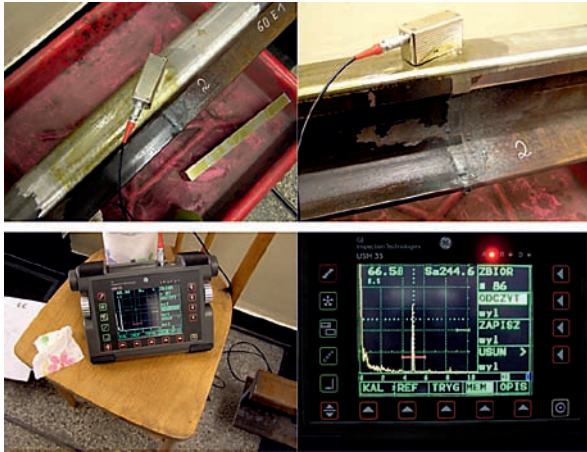
Zalecenia: obserwacja szyny, wymiana szyny, zamknięcie toru, natychmiastowa wymiana złamanej szyny.

Odpowiedzią na pytanie, co znajduje się w objętości elementu badanego są badania ultradźwiękowe. Dają możliwość wykrycia wad wewnętrznych oraz oceny ich wielkości. Podobnie jak w badaniach wizualnych, istnieje możliwość monitorowania rozwoju wady i porównywania z wcześniej przeprowadzanymi badaniami.

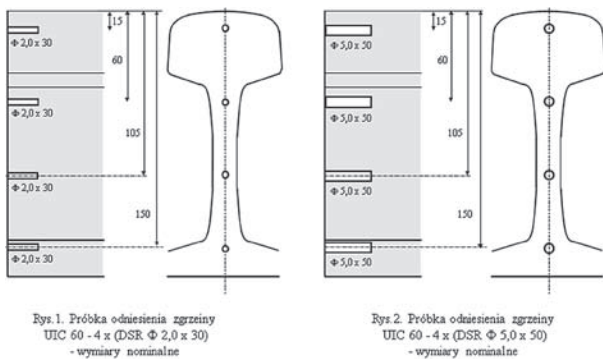
Wykrywanie wad w szynach jest jednym z pierwszych zastosowań badań ultradźwiękowych. Układy defektoskopowe

*Autor korespondencyjny. E-mail: lukasz.rawicki@is.gliwice.pl

stosowane na stanowiskach kontrolnych w hutach i w ruchomych urządzeniach do badań torowych są bardzo zaawansowane, rozwiązania konstrukcyjne mają jednak istotne ograniczenia. Badanie szyn zamocowanych na torze powoduje wprowadzanie fal ultradźwiękowych z powierzchni głowicy przez warstwę cieczy sprzęgającej z powierzchnią badania. Niemożliwy jest dostęp do powierzchni stopki i nie można wykryć rozwijających się pęknięć eksploatacyjnych w stopce. Poprzednie pęknięcia na szynach zaczynają się najczęściej na zewnętrznych krawędziach stopki. Nie wykryte wcześniej prowadzą do zniszczenia. Zestawy głowic ze sprzężeniem cieżowym nie dają właściwych efektów przy wykrywaniu pionowych pęknięć w główce, które powstają najczęściej w części środkowej głowicy. Niekorzystna orientacja i rozwój pęknięć w kierunku podłużnym i poprzecznym są bardzo niebezpieczne. Celem badania spawanych złączy szynowych jest wykrycie wad występujących w całym przekroju złącza. Badaniom podlegają spoiny i zgrzeiny wykonywane w trakcie napraw nawierzchni oraz inne w zależności od potrzeb [2].

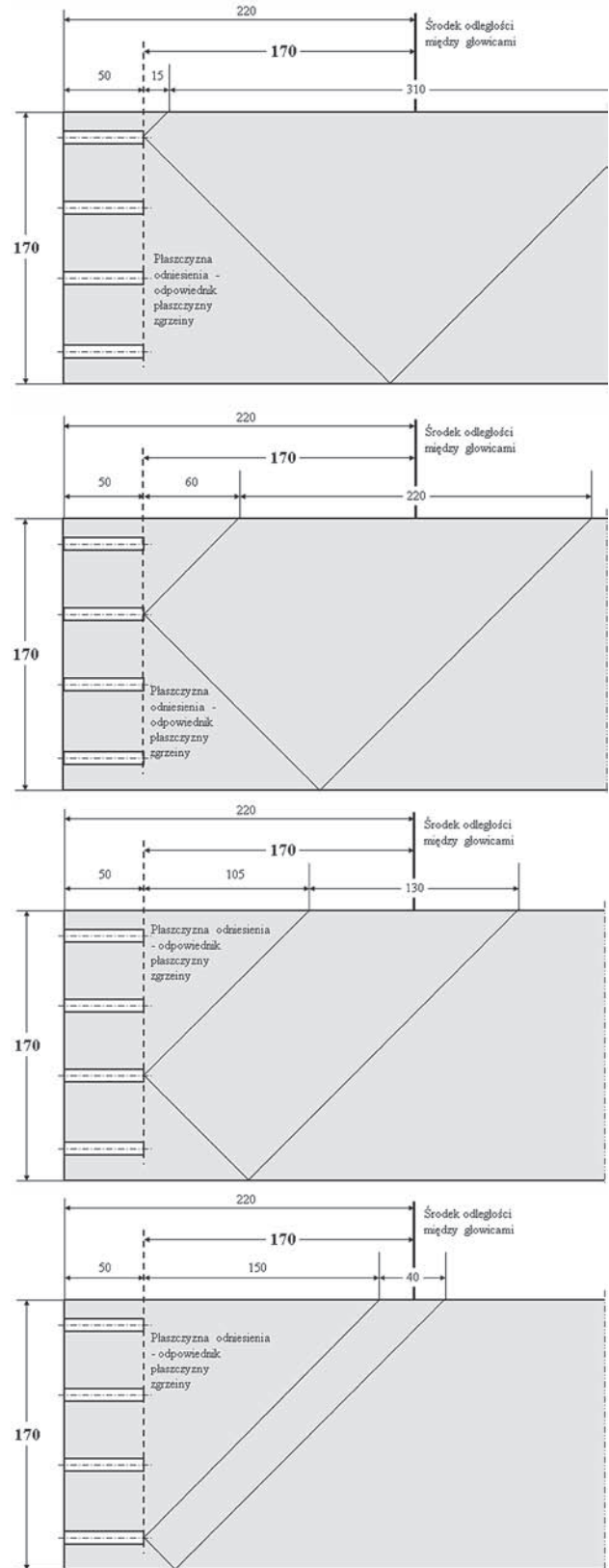


Rys. 2. Przykład wykorzystania ultradźwiękowej techniki echa [3].
Fig. 2. An example of the using of ultrasonic echo technique [3].



Rys. 3. Wzorce odniesienia z reflektorami wzorcowymi o średnicy 2mm oraz 5mm przy badaniu próbek ze zgrzeinami [3].
Fig. 3. Reference patterns with the reflectors standards with a diameter of 2mm and 5mm at examination of the welded samples [3].

W metodzie echa stosuje się pojedynczą głowicę, która początkowo stanowi nadajnik impulsów, a następnie zostaje „przełączona” i odgrywa rolę odbiornika. Sygnał wysyłany



Rys. 4. Przykłady lokalizacji wskazań na przykładzie próbek z reflektorami wzorcowymi [3].
Fig. 4. Examples of location of indications on the example of samples with standards reflectors [3].

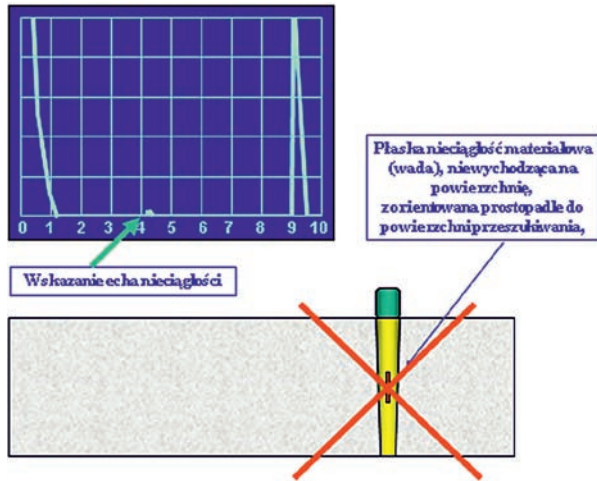
przez głowicę do materiału odbija się od nieciągłości lub od przeciwległej powierzchni i wraca do głowicy. Mierząc czas upływający od momentu wysłania impulsu do momentu

jego powrotu i odebrania przez głowicę można określić, znając prędkość fali ultradźwiękowej w materiale, odległość głowicy od przeszkody. Na podstawie wysokości echa niezgodności na ekranie defektoskopu, można określić jej przybliżony wymiar. Na rys. 2 pokazano przykład badania przy pomocy ultradźwiękowej techniki echa.

Na rysunku 3 pokazano przykład wykonanych wzorców do ustawiania czułości badania przy badaniu ultradźwiękowym szyn. Wzorce są wykonane ze sztucznymi reflektorami w postaci otworków o średnicy 2 i 5mm w każdej części badanej szyny tj. głowce, szyjce i stopce.

W technice tandem używa się układu dwóch głowic kątowych, nadawczej i odbiorczej, ustawionych w stałej odległości od siebie podczas przeszukiwania złącza. Dla zbadania całej objętości złącza układ głowic przesuwa się kilkakrotnie wzdłuż spoiny zmieniając odległość między głowicami tak, aby za każdym razem przeszukać inny obszar spoiny [3]. Sposób usytuowania głowic w technice tandem i lokalizacji wskazań na przykładzie próbek odniesienia pokazano na rysunku 4.

Zastosowanie techniki echa przy badaniu połączeń spawanych lub zgrzewanych na szynach kolejowych nie daje pozytywnych rezultatów, pokazuje to rys.5. Fala ultradźwiękowa natrafia na wadę zlokalizowaną w materiale, ale na ekranie defektoskopu ultradźwiękowego widać echo dna oraz bardzo słaby sygnał od wady materiału. Odebranie echa nieciągłości przez głowicę odbiorczą może być zobrazowane przez fale impulsową lub ciągłą.

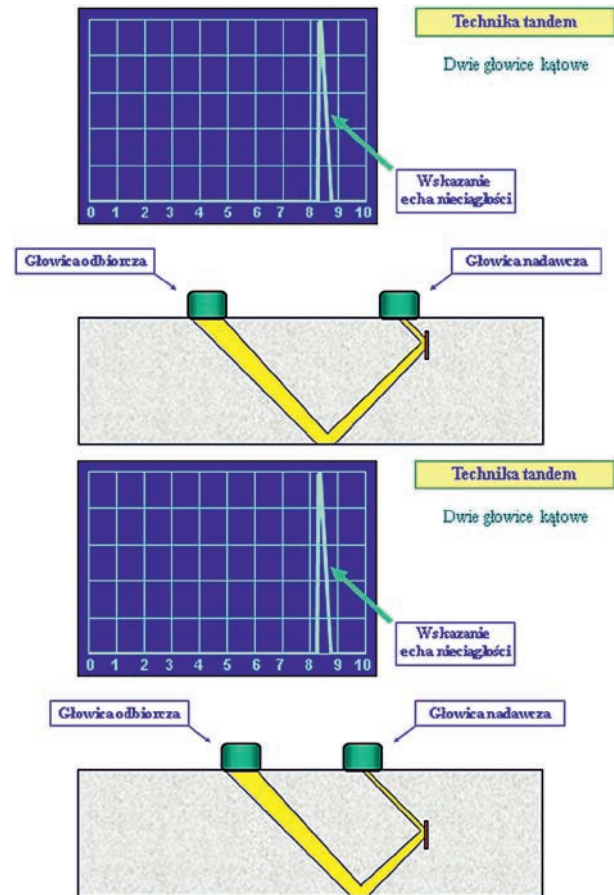


Rys. 5. Zobrazowanie nieciągłości w technice echa [3].
Fig. 5. Imaging of discontinuities in echo technique [3].

Na rysunku 6 pokazano zastosowanie techniki tandem. Głowice ultradźwiękowe ustawione są w określonej odległości względem siebie. Wiązka ultradźwiękowa wyemitowana przez głowicę nadawczą natrafia na nieciągłość zorientowaną w materiale i po odbiciu od niej zostaje odebrana przez głowicę nadawczą. Impuls echa nieciągłości w postaci wielkości amplitudy sygnału zostaje odebrany i zaobserwowany na zakresie podziałki podstawy czasu ekranu defektoskopu ultradźwiękowego.

Na rysunku 7 widać przyrząd do badania szyn w technice tandem. Na specjalnych prowadnicach osadzone są głowice

2T45o. Podziałka milimetrowa ułatwia ustawienie głowic w odpowiednich położeniach względem siebie. Przewody zasilające wyprowadzone od góry ułatwiają przesuwanie głowic względem siebie i umożliwiają ich stabilne zamocowanie. Wytyczne Id-17:2005 „Wytyczne ultradźwiękowych badań złączy szynowych, zgrzewanych i spawanych” opracowane przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. dopuszczają zastosowanie głowic 3T45o [4]. Zobrazowanie pochodzących impulsów od wad w objętości elementu badanego przekazywane jest w zobrazowaniu typu A pokazującym zobrazowanie amplitudy sygnału ultradźwiękowego w funkcji czasu.



Rys. 6. Zastosowanie ultradźwiękowej techniki tandem [3].
Fig. 6. Application of the ultrasonic tandem technique [3].

Przełomem w zastosowaniu badań ultradźwiękowych jest technika Phased Array, która stanowi rozwinięcie konwencjonalnych badań ultradźwiękowych techniką echa. W technice Phased Array znalazły zastosowanie głowice mozaikowe, zawierające pewną liczbę niewielkich, niezależnie sterowanych przetworników (zazwyczaj 16-64). Zastosowanie głowicy mozaikowej umożliwia wprowadzenie serii wiązek ultradźwiękowych, przetworzenie otrzymanych sygnałów i ich analizę w postaci graficznej z amplitudą kodowaną paletą barw. Powstały w ten sposób S-skan obrazujący położenie wskazań na tle konturu rowka spoiny znacznie ułatwia późniejszą ocenę i charakteryzowanie wykrytych wskazań [5].

W technice Phased Array możliwe jest sterowanie kątem wprowadzenia wiązki ultradźwiękowej, co daje

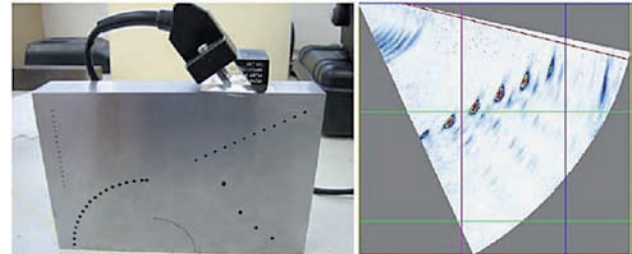
możliwość uzyskania dowolnych kątów padania lub załamania wiązki poprzez pobudzenie wskazanych przetworników głowicy w zaprogramowanych sekwencjach. Jedną głowicą daje możliwość przeprowadzenia skanów przy różnych kątach. Zaletą tej techniki jest również skrócenie czasu badań, co wiąże się m.in. z brakiem konieczności wymiany głowic, a co za tym idzie ponownych kalibracji sprzętu. Na rysunku 8 pokazano przykład bloku kalibracyjnego oraz system do badania półautomatycznego PA przedstawione są na rysunku 9. W technice PA do obiektu badanego w celu przeszukania objętości badanego materiału wprowadza się wiązkę ultradźwiękową przy wykorzystaniu fal poprzecznych. Stosowane częstotliwości, zakresy stosowanych przetworników, jak również stosowane charakterystyki wiązek ultradźwiękowych nie różnią się od stosowanych w tradycyjnych badaniach ultradźwiękowych. Zasada badania jest bardzo zbliżona do klasycznej metody ultradźwiękowej. Akceptacja wskazania polega na pomiarze maksymalnej amplitudy echa w odniesieniu do ustalonego echa reflektora wzorcowego.



Rys. 7. Przyrząd do badania w technice tandem [3].
Fig. 7. The examination device in tandem technique [3].

Zakres badania jaki może być zastosowany w technice PA zależy od czynników związanych z warunkami konstrukcyjnymi głowicy takich jak: budowa głowicy, częstotliwość, apertura. Ustawienie aparatury w badaniach techniki PA jest zadaniem dużo trudniejszym niż w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych. Na etapie wejściowym wprowadzeniu podlegają parametry wizualizacji przekroju

elementu badanego, takie jak grubość badanego materiału, pozycjonowanie używanych głowic względem siebie; opóźnienia dla używanych skanów liniowych lub sektorowych; kalibracja używanego sprzętu w postaci m.in. czułości badania i rozdzielczości enkodera. Nowoczesne systemy posiadają kreatory badania pozwalające na łatwe wprowadzenie wszystkich parametrów i wykonanie wymaganych kalibracji.



Rys. 8. Głowica i blok kalibracyjny do badań PA oraz zobrazenia 2D otworów [5].
Fig. 8. The head and calibration block for PA examination and 2D imaging of holes [5].



Rys. 9. System do półautomatycznych badań PA-głowica z zainstalowanym enkodermem oraz zobrazowanie niezgodności w badanym złączu [5].
Fig. 9. System for semi-automatic studies PA-head with an installed encoder and imaging of discrepancies in the tested joint [5].

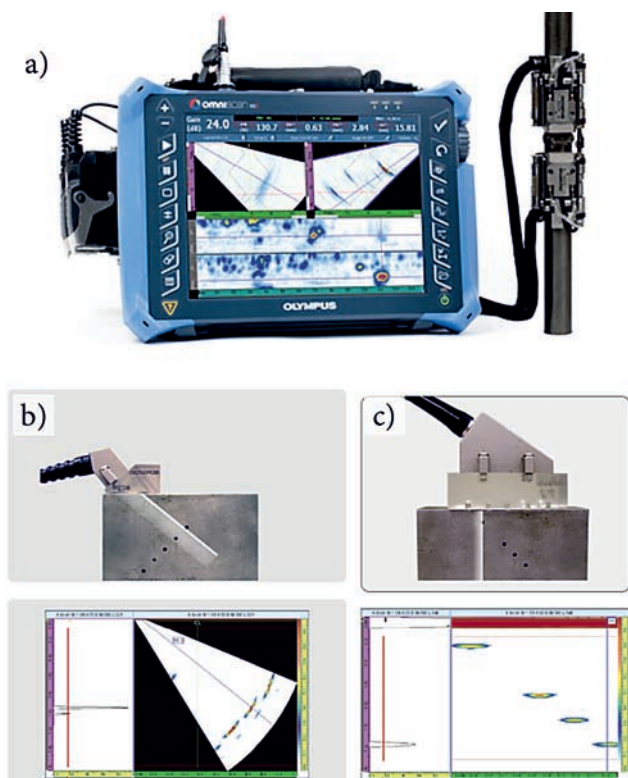
Na rysunku 10a pokazano defektoskop wraz ze skanerem do przeprowadzania badań PA. Na ilustracjach b i c widoczne są przykłady zobrażeń skanu liniowego i sektorowego.

W technice Phased Array wykorzystywane są znormalizowane wzorce zgodnie z normą ISO 19675. Przykład znormalizowanego wzorca dla techniki PA pokazano na rysunku 12.

Technika PA wykorzystuje do przeszukania objętości materiału dwa rodzaje elektronicznych skanów. Wykorzystywane skany to E-skan liniowy i S-skan sektorowy pokazane

na rysunkach 13, 14, 15 i 16.

W skanie typu E punkt wyjścia wiązki ultradźwiękowej przesuwana się wzdłuż głowicy, co pozwala na przeszukiwanie różnych obszarów złącza spawanego szyny. Staje się to możliwe dzięki jednoczesnemu pobudzeniu zespołów głowicy liniowej w kolejnych cyklach częstotliwości przetwarzania. W badaniach konwencjonalnych przemieszczanie wiązki odbywa się fizycznie za pomocą ruchu głowicy. W technice PA przemieszczanie wiązki odbywa się za pomocą sygnałów elektronicznych.



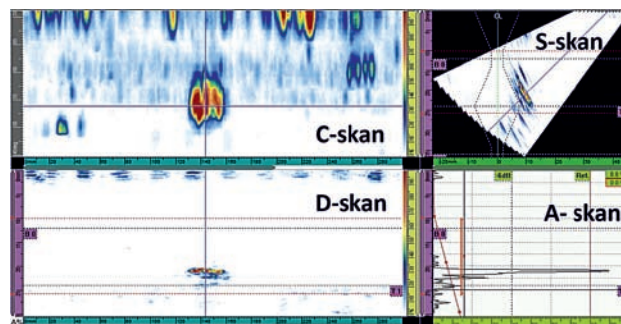
Rys. 10. a) Defektoskop i skaner do badań PA, b) głowica skośna PA do badań i wyniki badania z wykorzystaniem skanu sektorowego, c) głowica prosta PA i wyniki badania z wykorzystaniem skanu liniowego [5].

Fig. 10. a) Flaw detector and scanner for PA examination, b) oblique head for PA examination and test results using a sector scan, c) head straight for PA examination and test results using a linear scan [5].

Na rysunku 11 zaznaczono rodzaje zobrażeń 2D możliwych do uzyskania w oparciu o wcześniej wykonane badania enkodowane z pełnym zapisem wyników [5].

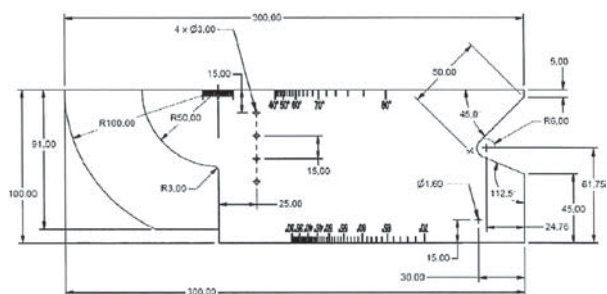
Wykonanie badania wiąże się z szeregiem wprowadzonych parametrów wstępnych takich jak m.in. odległość głowicy od środka spoiny, kąt fali wprowadzonej do materiału badanego. W przypadku badania typowych złączy spawanych kolejne wiązki fali ultradźwiękowej generowanej w E-Skanie pokrywają całą objętość spoiny i przylegającej do niej strefy wpływu ciepła. Skanowanie liniowe typu E, którego przykład w technice PA pokazano na rys. 13, sprawdza się do wykrywania nieciągłości, jakimi są przyklejenia brzegowe, pod warunkiem odpowiedniego dopasowania kąta emitowanej wiązki. Minusem skanu typu E jest stosowanie wieloprzetwornikowych głowic dla techniki PA dla odpowiednio

długich zakresów wiązki ultradźwiękowej. Kontroli wymaga również utrzymanie na odpowiednim poziomie sprzężenie akustyczne odpowiedzialne za kontakt głowicy z obiektem badanym [6].



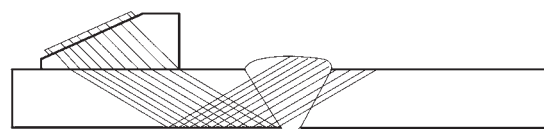
Rys. 11. Przykłady zobrażeń uzyskiwanych w badaniach półautomatycznych [5].

Fig. 11. Examples of images obtained in semi-automatic studies [5].



Rys. 12. Wzorec dla techniki Phased Array zgodnie z normą ISO 19675 [5].

Fig. 12. Pattern for the Phased Array technique in accordance with ISO 19675 [5].



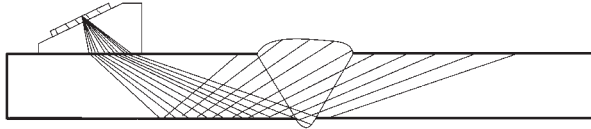
Rys. 13. Zasada skanu liniowego w technice PA badań ultradźwiękowych [7].

Fig. 13. The principle of linear scan in the PA technique of ultrasonic examinations [7].

Skanem stosowanym również w technice PA jest skan typu S, którego zasadę zobrażenia w technice PA jako skan sektorowy pokazano na rys.14. Wiązki ultradźwiękowe emitowane z głowicy ultradźwiękowej różnią się między sobą kątem pod jakim wchodzi do elementu badanego. W zakresie kątowym należy uwzględnić odległość głowicy od osi spoiny elementu badanego tak, aby wiązka elektronicznego S-skanu mogła pokryć objętość badanej spoiny i strefy wpływu ciepła. Do zalet badania S-skanem w technice PA należy mniejszy rozmiar stosowanych głowic, zazwyczaj głowic 16 elementowych [6].

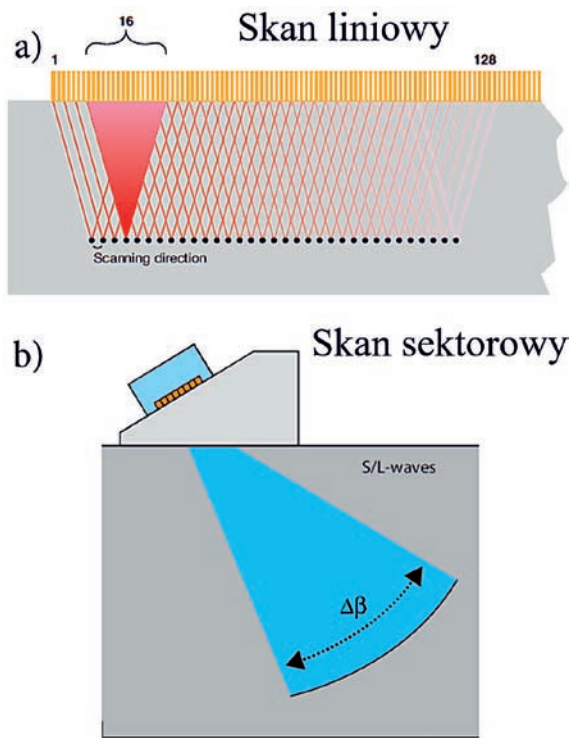
Zakres kątowy w technice PA w badaniach wiązką fal poprzecznych powinien być zawężony do kątów w granicach przedziału 40-75°. Nie należy stosować kątów poniżej 33°, ponieważ w badanym materiale mogą powstać zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne. Badania techniką PA mogą być

wykonywane zarówno techniką manualną, czyli ręczną, jak również automatyczną. Często wykorzystywaną techniką jest technika półautomatyczna, gdzie przesuw skanera razem z głowicami następuje ręcznie, a rejestracja danych w sposób automatyczny przy pomocy stosowanego enkodera.

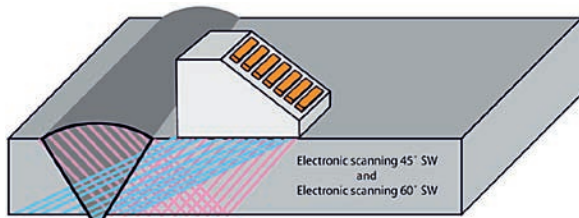


Rys. 14. Zasada działania skanu sektorowego w technice PA badań ultradźwiękowych [7].

Fig. 14. Principle of operation of the sector scan in the PA technique of ultrasonic examinations [7].



Rys. 15. Rodzaje skanów w PA-liniowy i sektorowy [5].
Fig. 15. Types of scans in PA-linear and sectoral [5].



Rys. 16. Przykład badania głowicą PA z zastosowaniem podwójnego skanu liniowego kąt wprowadzenia wiązki 45° i 60° [5].
Fig. 16. Example of testing with a PA head using a double linear scan, angle of beam introduction 45° and 60° [5].

Do zalet techniki Phased Array można zaliczyć [5]:

- duża szybkość badania, znacznie wyższa niż w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych;
- ocena wyników badania może być prowadzona off-line na komputerze PC;
- intuicyjna, graficzna wizualizacja wskazań;

- duże możliwości w zakresie charakteryzowania wskazań (określanie rodzaju niezgodności);
- możliwość wyznaczenia wymiarów geometrycznych niezgodności;
- możliwość archiwizowania wyników badania w postaci cyfrowej;
- możliwość powtórnej oceny wyników badania przez inną osobę (podobnie jak w przypadku radiografii);
- szeroki zakres możliwych zastosowań techniki PA;
- możliwość elektronicznego kształtowania wiązki ultradźwiękowej (kąta wprowadzenia, apertury, z której generowana jest wiązka i ogniskowania wiązki);
- możliwość symulowania jedną głowicą Phased Array głowic konwencjonalnych o różnych kątach wprowadzenia wiązki i różnych parametrach ogniskowania;
- możliwość badania techniką tandem przy zastosowaniu pojedynczej głowicy PA;
- możliwość prezentacji graficznej wyników w czasie rzeczywistym (S-Skan, E-Skan);
- istotne zwiększenie szybkości badania, w stosunku do konwencjonalnych badań ultradźwiękowych;
- możliwość automatyzacji badań;
- możliwość stosowania zarówno oceny amplitudowej, jak i wymiarowej wykrytych wskazań;
- możliwość pełnego zapisu wyników w przestrzeni 3D (skan enkodowany);
- ułatwiona interpretacja wyników badania, w szczególności dla obiektów (złączy) o złożonej geometrii.

Z powodu dużych możliwości i istotnych zalet techniki PA w stosunku do innych technik i metod badań nieniszczących należy oczekiwać szybkiego wdrażania ich w praktyce przemysłowej. Można oczekiwać, że badanie tą techniką znajdzie również zastosowanie w zakresie badań szyn kolejowych lub ich złączy.

Literatura/References

- [1] Makuch J.: Prezentacja. Diagnostyka szyn, wady w szynach. Katedra Mostów i Kolei. Politechnika Wrocławska. Wrocław 2015
- [2] Deputat J.: Nowe Techniki Badań Ultradźwiękowych. Pracownia Ultradźwiękowych badań materiałów. IPPT PAN Warszawa
- [3] Hottowy G.: Materiały własne firma Ekstplast.
- [4] Wytyczne PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Id-17:2005.: Wytyczne ultradźwiękowych badań złączy szynowych, zgrzewanych i spawanych. Warszawa 2005
- [5] Kaczmarek K.: Prezentacja. Nowoczesne techniki badań ultradźwiękowych oraz ich zastosowanie. Gliwice 2017
- [6] Mackiewicz S.: Badania złączy spawanych techniką Phased Array w świetle wymagań PN-EN ISO 13588. Przegląd Spawalnictwa nr 12/2015, s. 101-106
- [7] Mackiewicz S.: Ultradźwiękowe badania złączy spawanych techniką Phased Array. XXI Nieniszczące Badania Materiałów. Zakopane 18-20 marca 2015