
XX Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane 12-14 marca 2014

WYKRYWANIE PEKNIĘĆ OSI KOLEJOWYCH METODĄ ULTRADŹWIĘKOWĄ

Jacek SZELAŻEK
IPPT PAN, Warszawa
jszela@ippt.gov.pl

1. Wstęp

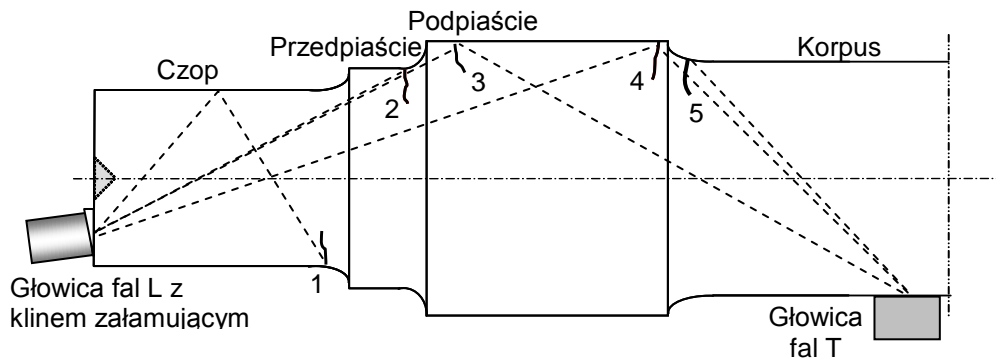
Osie kolejowe badane są metodami nieniszczącymi od kilkudziesięciu lat. Choć są projektowane jako elementy o nieskończonej trwałości zmęczeniowej, co roku dochodzi do awarii spowodowanych ich pękaniem. Główną przyczyną awarii są pęknięcia zmęczeniowe powstające się w czasie eksploatacji osi. Ich możliwie wczesne wykrycie jest celem prowadzonych okresowo, zazwyczaj w czasie remontów, badań zestawów kołowych. Pęknięcia zmęczeniowe, rozpoczynające się od powierzchni mogą być wykryte metodami wizualną, magnetyczną, penetracyjną i ultradźwiękową. Ta ostatnia jest najczęściej stosowana ponieważ umożliwia również wykrywanie wad niewidocznych, rozwijających się pod przykrywającymi je osadzonymi na osiach kołami, tarczami hamulcowymi czy łożyskami. Najczęściej stosowane są dwie techniki badania metodą ultradźwiękową:

- 1 – głowicami kątowymi na fale podłużne sprzęganymi do powierzchni czołowych osi,
- 2 – głowicami kątowymi na fale poprzeczne sprzęganymi do dostępnych powierzchni walcowych osi, zazwyczaj między podpięciami czy miejscami osadzenia tarcz hamulcowych (do korpusu osi).

Badania ultradźwiękowe od czoła i z powierzchni walcowych przy wykorzystaniu różnych typów głowic, w tym i Phased Arrays, opisane są w wielu pracach. Ciekawy sposób badania osi od czoła głowicami wieloelementowymi opisany jest w pracy [1] (fragmenty tej pracy prezentowane były podczas 42KKBN w Kołobrzegu). Autorzy wykorzystali specjalnie zbudowane dwuwymiarowe matryce ultradźwiękowe sprzęgane do czoła osi, które do wprowadzania i odbioru fal optymalnie wykorzystują dostępną płaską powierzchnię czoła. W pozycji gdzie pod matrycą znajduje się otwór, pracują jedynie boki matrycy, jeden jako nadajnik a drugi jako odbiornik. Umożliwia to wykrycie wad „zasłanianych” otworem. W miejscach między otworami cała matryca pracuje metodą echa. Wykorzystanie dwuwymiarowej matrycy pozwala na sterowanie wiązką w dwóch płaszczyznach – na zmianę kąta załamania wiązki, na zmianę kierunku wiązki w kierunku obwodowym i dodatkowo na ogniskowanie wiązki. Sterowanie wiązką w kierunku obwodowym podnosi wykrywalność wad rozwijających się na powierzchni pod pewnym kątem do kierunku obwodowego. Opisany w pracy układ może być zaprogramowany do badania różnych osi (różne średnice czoł, ilości otworów i ich rozmieszczenie na czole). Wydaje się, że w przypadku gdy badania osi z powierzchni walcowej (z korpusu) jest niemożliwe, opisany sposób badania zapewnia najwyższą dzisiaj wykrywalność pęknięć. Eksperymenty wykazały możliwość wykrywania wad o głębokości 1 mm, ulokowanych w różnych obszarach na powierzchni osi. Osie, których nie można badać sprzęgając głowice do powierzchni walcowych (korpus, przedpięcie) wchodzą obecnie do eksploatacji. W Mińsku Mazowieckim (Lucchini Polska)

produkowane są zestawy, których osie pokrywane są grubą (około 4 mm), trwałą i chropowatą epoksydową warstwą chroniącą je przed korozją i uszkodzeniami mechanicznymi. Gruba i chropowata warstwa uniemożliwia jednak ich badania ultradźwiękowe głowicami kątowymi na fale poprzeczne i jednym sposobem wykrywania w nich pęknięć jest badanie od czoła.

Klasyczne, najczęściej stosowane dziś sposoby badania typowych osi pełnych różnymi technikami, wady sztuczne stosowane do ustawiania czułości badania, ich wielkości i położenia oraz przepisy dotyczące badań osi opisane są szczegółowo w pracy [2]. Typowe położenia wad powstających w osiach i drogi fal ultradźwiękowych przy badaniu od czoła i z powierzchni walcowej pokazano na rysunku 1 pochodzącym z pracy [3].



Rys. 1. Typowe położenia pęknięć zmęczeniowych powstających w czasie eksploatacji osi i typowe sposoby ich wykrywania, od czoła osi falami podłużnymi i z powierzchni walcowej falami poprzecznymi (z pracy [3]).

Wspólną cechą tych dwóch sposobów badania jest to, że prowadzone są one metodą echa (ta sama głowica pełni rolę nadajnika i odbiornika fal) i to, że fale ultradźwiękowe rozchodzą się po liniach leżących w płaszczyźnie osiowego przekroju osi. Ta druga cecha i znaczne rozmiary osi powodują, że odległości między głowicą a pęknięciami są duże. W przypadku badania z powierzchni walcowej, dla osi o średnicy 190 mm i głowicy o kącie załamania 45° (głowica fal T i wada Nr 5 na rysunku 1), odległość ta wynosi około 280 mm. Jeszcze większe odległości ma do przebycia fala podłużna przy badaniu z powierzchni czołowej. Na przykład odległość od czoła osi do pęknięcia powstałego za podpiaściami, dla osi kolejowej typu A-130, wynosi blisko 0,5 m. Oznacza to, że w klasycznych sposobach wykrywania pęknięć w osiach poszukuje się odbicia fal od reflektora położonego w odległości wielu pól bliskich głowicy. Na przykład przy wykrywaniu wady leżącej w odległości 460 mm głowicą na fale podłużne o częstotliwości 2 MHz i średnicy przetwornika 24 mm, wada znajduje się w odległości blisko 10 pól bliskich wytwarzanej przez głowicę wiązki fal ultradźwiękowych. Podobnie jest w przypadku badania osi głowicami kątowymi na fale poprzeczne. Wady na podpiaściu wykrywane głowicami sprzęganymi do środkowej, walcowej części osi (do korpusu osi), leżą również w odległościach kilku pól bliskich głowic kątowych.

Znaczne odległości między głowicą a wadą oznaczają, że ciśnienie akustyczne fali padającej na wadę jest niskie. Wynika to ze spadku ciśnienia wywołanego rozbieżnością wiązki i tłumienia fal na drodze głowica-wada-głowica. Rozbieżność wiązki teoretycznie można ograniczyć stosując wyższe częstotliwości fal ale przeciwko temu przemawia rosnące wraz z częstotliwością tłumienie fal. W sumie duża odległość i niska częstotliwość oznaczają, że wykrywalność wad jest ograniczona. Zgodnie z zależnościami wiążącymi amplitudę echa wady z odległością (wykres AVG), amplituda echa wady leżącej w odległości 10 pól bliskich jest 100-krotnie niższa (co odpowiada spadkowi o 40dB) od amplitudy echa takiej samej

wady leżącej w odległości jednego pola bliskiego. Optymalną konfiguracją, zapewniającą najwyższą wykrywalność wad, byłoby zastosowanie takiej głowicy (częstotliwość fal, wymiar przetwornika) aby wada znajdowała się w odległości zbliżonej do długości pola bliskiego głowicy. Niestety, w przypadkach badania osi kolejowych typowymi sposobami, jest to niemożliwe. Wymagało by to stosowania przetworników o rozmiarach uniemożliwiających ich sprzęgnięcie akustyczne do osi albo stosowanie fal o bardzo wysokich częstotliwościach. W badaniach od czoła osi wymiary przetworników są ograniczone średnicą czoła oraz dodatkowo nakiełkiem i otworami gwintowanymi. Można do niego sprzęgać głowice o przetwornikach o średnicy nie większej niż 25 mm. Dla głowicy o takim przetworniku i częstotliwości 2 MHz długość pola bliskiego jest równa jedynie około 50 mm. Sprzęgając głowicę kątową do powierzchni walcowej, wymiar przetwornika w kierunku obwodowym jest ograniczony przez krzywiznę osi. Przy przejściu fali z klina załamującego głowicy do stali przez walcową, wypukłą powierzchnię styku obserwowany jest dodatkowy wzrost rozbieżności wiązki co powoduje szybszy spadek ciśnienia akustycznego wraz z odległością.

Innym czynnikiem utrudniającym wykrywanie małych wad jest to, że przy wykrywaniu pęknięć zmęczeniowych rozwijających się od powierzchni fale odbijają się od naroża utworzonego przez powierzchnie wady i walcową powierzchnię osi. W przypadku badania z powierzchni walcowej, głowicami kątowymi na fale poprzeczne, współczynnik odbicia od naroża, w szerokim zakresie kątów padania, jest równy 1. Ale w badaniach prowadzonych od czoła osi falami podłużnymi rozchodzącymi się pod małym kątem, wartość współczynnika odbicia od naroża jest wielokrotnie mniejsza [2]. Dodatkowym czynnikiem mogącym obniżyć wykrywalność wad rozwijających się na podpiąściu, w osiach z założonymi kołami, jest spadek współczynnika odbicia fal wynikający z przenikania fal przez granicę osi i dociśniętej do niej piasty koła [4].

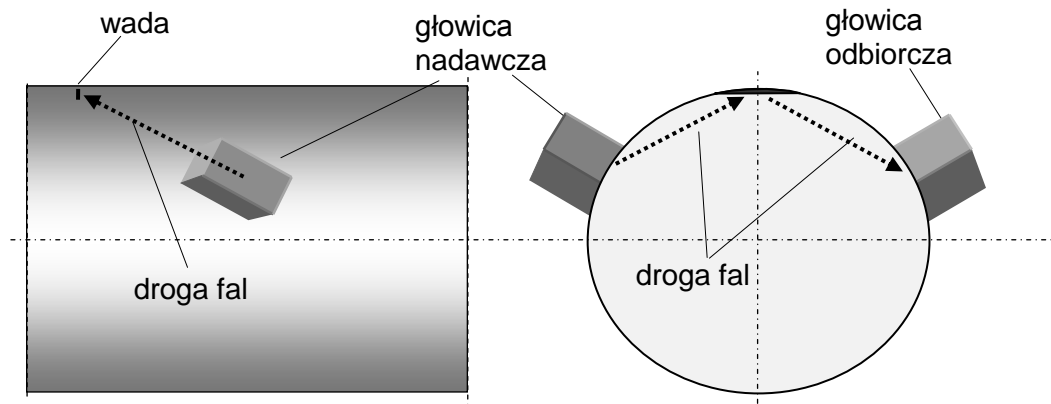
Prowadzący badania ultradźwiękowe nie ma wpływu na utrudnienia wynikające z geometrii osi kolejowych. Nie ma też wpływu na kątowe zależności współczynnika odbicia fal od naroża czy na zmiany tego współczynnika wynikające z kontaktu osi z piastą koła czy z „zamykaniem” się pęknięcia. W przypadku badania osi klasycznymi technikami (głowice z pojedynczymi przetwornikami, standardowa aparatura jednokanałowa) wydaje się, że jedyną możliwością podniesienia wykrywalności wad jest zredukowanie odległości między głowicami a wadami oraz umożliwione taką redukcją drogi podwyższenie częstotliwości fal. Celem pracy jest przedstawienie sposobu badania osi, w którym wykorzystane są głowice ustawione możliwie blisko wad powstających w osiach kolejowych.

2. Wykrywanie wad w osiach parą głowic pracujących metodą przepuszczania

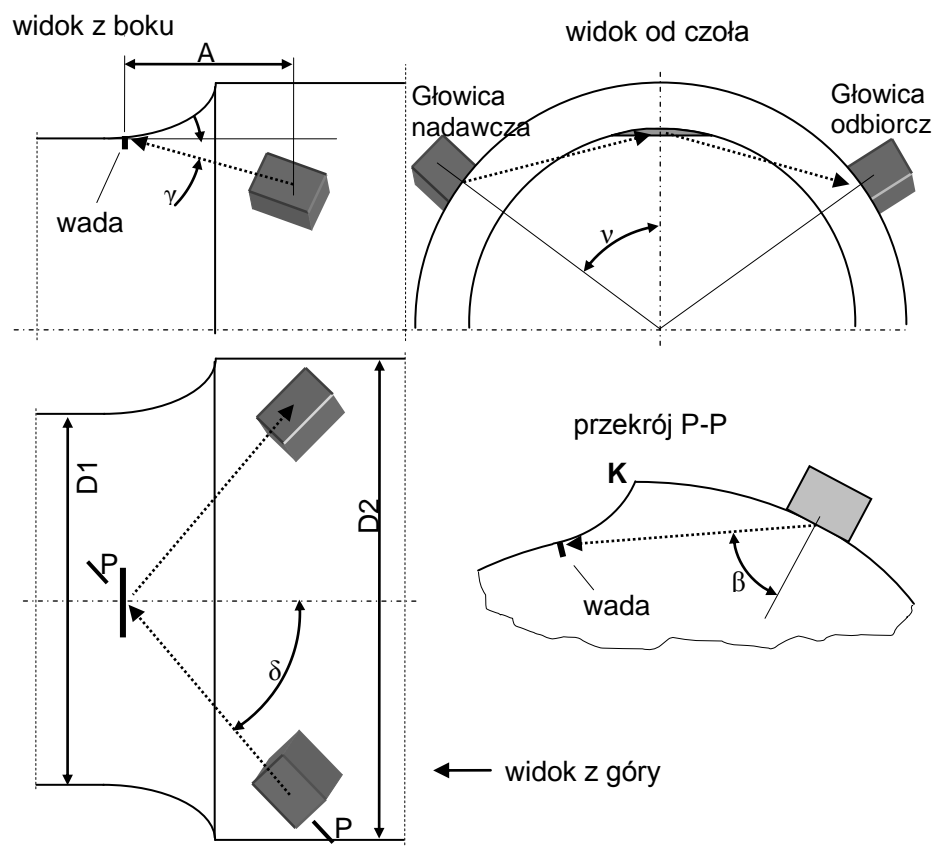
W elementach walcowych możliwe jest wykrywanie pęknięć rozwijających się od powierzchni i ustawionych w kierunku obwodowym parą głowic pracujących metodą przepuszczania [5] co pokazano schematycznie na rysunku 2. Dwie odpowiednio wyprofilowane głowice kątowe sprzęgnięte są do walcowej powierzchni elementu. Fala wytworzona przez głowice nadawczą biegnie po cięciwie do wady, ulega na narożu utworzonym przez powierzchnię wady i zewnętrzną powierzchnię elementu odbiciu i dociera do identycznej głowicy odbiorczej ustawionej symetrycznie, z drugiej strony walca. O ile możliwe jest dowolne ustawienie głowic względem wady, kąty załamania i skręcenia głowic względem tworzącej walca można dobrać tak, aby współczynnik odbicia fal od naroża utworzonego przez wadę i zewnętrzną powierzchnię elementu osiągał maksimum.

W porównaniu do badania falami rozchodzącymi się w płaszczyźnie osiowego przekroju walca (jak w badaniach osi z powierzchni walcowych) droga fal w materiale jest znacznie krótsza. A więc spadek ciśnienia wywołany rozbieżnością i tłumieniem jest niższy.

Przedstawioną na rysunku 2 techniką możliwe jest też wykrywanie wad w walcowych elementach o stopniowanych średnicach. Na rysunku 3 pokazano schemat wykrywania pęknięć rozwijających się w strefie przejścia między średnicą $D1$ (mniejszą, np. czop osi) głowicami ustawionymi na części o większej średnicy $D2$ (np. przedpiaście osi).



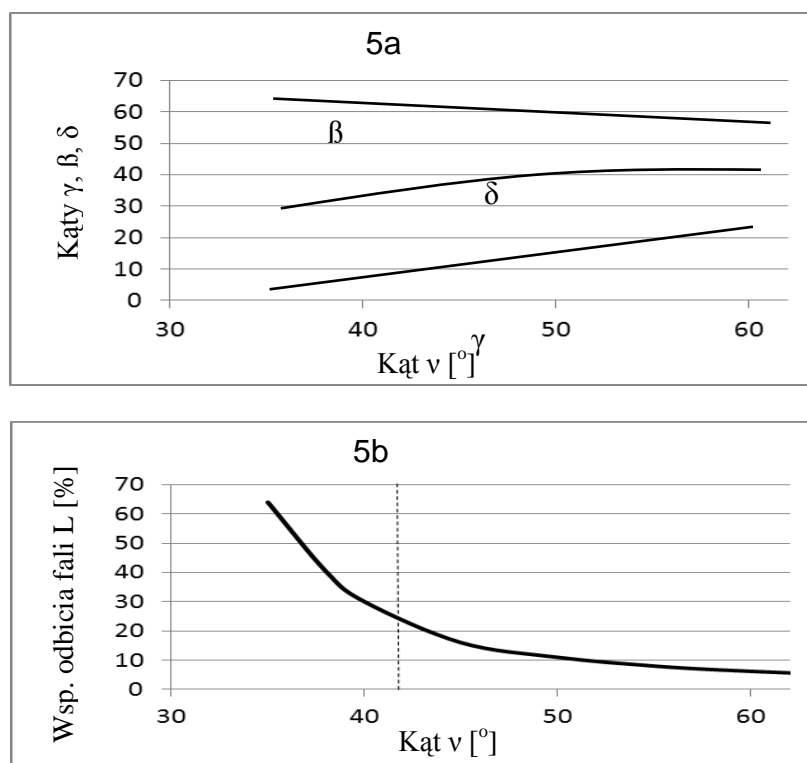
Rys. 2. Schemat wykrywania pęknięcia zaczynającego się od powierzchni i rozwijającego się w kierunku obwodowym, parą głowic pracujących metodą przepuszczania.



Rys. 3. Schemat wykrywania wady rozwijającej się na średnicy mniejszej głowicami sprzęgniętymi do części o większej średnicy.

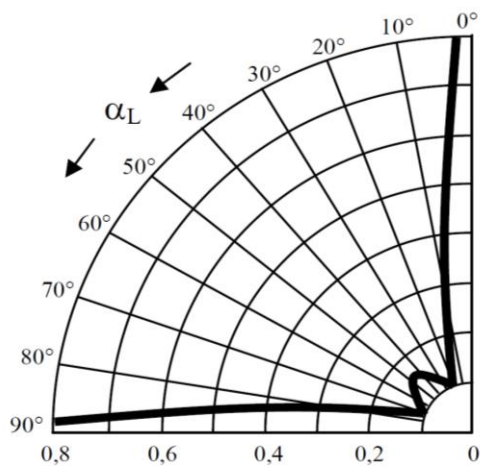
Geometria wiązki padającej na wadę jest opisana kątami rozwarcia v i skręcenia δ . Kąt załamania głowicy, pokazany w przekroju P-P wynosi β . Kąty te są zależne od średnic $D1$, $D2$, odległości A oraz od kąta rozwarcia v .

Podobnie jak w badaniach metodą echa, przy badaniu sposobem pokazanym na rysunkach 2 i 3 amplituda echa wady jest zależna od współczynnika odbicia od naroża utworzonego przez powierzchnię pęknięcia i zewnętrzną, walcową powierzchnię osi. Na rysunku 4a pokazano zależności między kątami γ , δ i β dla różnych położenia głowic opisanych kątem ν pokazanym na rysunku 3. Dla pęknięcia ustawionego prostopadle do tworzącej części walcowej osi, współczynnik odbicia fali podłużnej od naroża zmienia się w zależności od kąta ν tak jak pokazano na rysunku 4b. Najwyższe wartości współczynnika odbicia obserwowane są dla małych kątów ν . Niestety dla osi o typowych średnicach przedpiaścia i czopa, minimalna wartość kąta ν , dla której droga fali nie jest zasłaniana podtoczeniem, wynosi około 42° . Dla takiego kąta ν i dla odległości $A=65$ mm, współczynnik odbicia fali podłużnej od naroża wynosi około 25%. Dla przypomnienia na rysunku 5 pokazano kątową zależność współczynnika odbicia fali podłużnej od prostokątnego naroża, dla fali padającej na naroże w płaszczyźnie rysunku. Wynika z niego, że wartość współczynnika odbicia 25% uzyskuje się dla kątów załamania głowic jedynie w granicach $0 - 10^\circ$. Geometria typowych osi powoduje, że najmniejsze kąty załamania fal podłużnych stosowanych w badaniach osi od czoła wynoszą około 13° [6] co powoduje, że wartości współczynnika odbicia fal od pęknięć są niższe niż 25%.

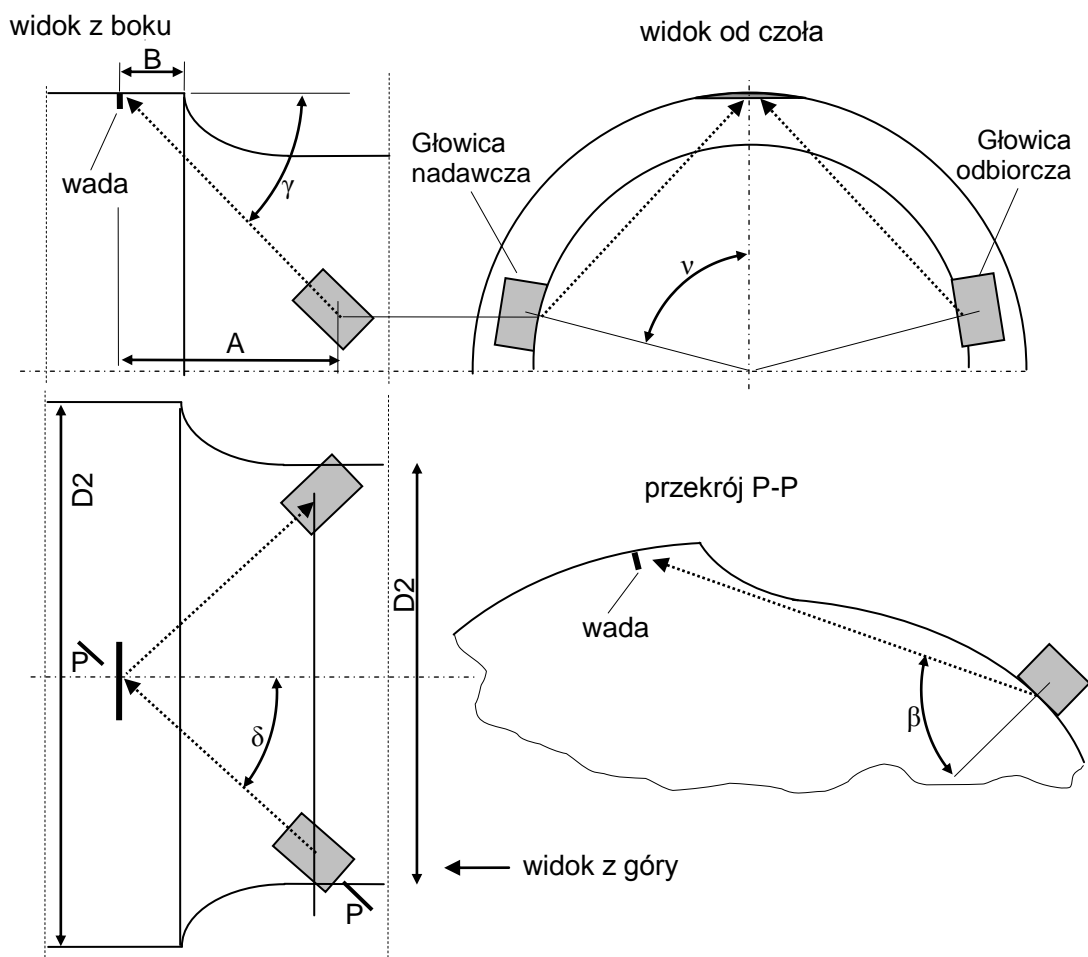


Rys. 5. Zależności między kątami δ , β , i γ a kątem ν (rys. 4a) i zależność współczynnika odbicia fali podłużnej od kąta ν (rys. 4b).

Podobnie, choć z pewnymi ograniczeniami zależnymi od promienia przejścia między różnymi średnicami, możliwe jest wykrywanie wad leżących na większej średnicy parą głowic sprzęgnięta do średnicy mniejszej. Schemat takiego badania pokazano na rysunku 6. Mankamentem takiego sposobu badania jest brak możliwości wykrycia wad leżących w małych odległościach od krawędzi większej średnicy (od odległości B na rysunku 6). Wady rozwijające się bardzo blisko krawędzi są zasłaniane krzywizną przejścia między średnicami (jest to mankament dotyczący wszystkich technik badania).



Rys. 5. Zależność współczynnika odbicia fali podłużnej od prostokątnego naroża w funkcji kąta padania fali [7].



Rys. 6. Schemat wykrywania wady rozwijającej się na średnicy większej głowicami sprzęgniętymi do części o mniejszej średnicy.

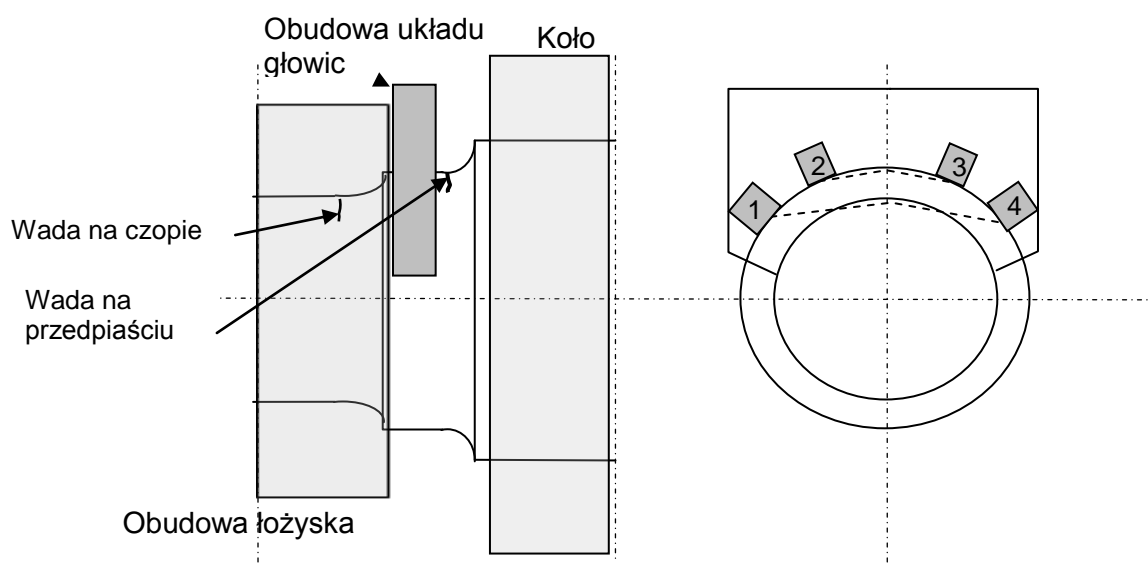
3. Przykład wykonania

Zgodnie ze schematami pokazanymi na rysunku 3 wykonany został zespół głowic przeznaczony do wykrywania pęknięć na czopie i na przedpiaściu osi. Zestaw ten pokazano na rysunku 7. Wszystkie głowice wykorzystane w tym zestawie to głowice kątowe na fale podłużne o częstotliwości 2 MHz. Głowice Nr 1 i 4, wykrywające wady na czopie, posiadały przetworniki piezoelektryczne o średnicy 20mm. Głowice Nr 2 i 3, przeznaczone do wykrywania wad na przedpiaściu, miały przetworniki o średnicach 13 mm. Odległości między głowicami a wadami były w tym przypadku zbliżone do długości pól bliskich głowic dla głowic Nr 1 i 4 oraz nieco większe od długości pola bliskiego dla głowic Nr 2 i 3. W czasie badania głowicami Nr 1-4 widoczne było stałe echo od naroża K pokazanego na rysunku 3.

Czułość układu głowic sprawdzono na wadach sztucznych wykonanych jako nacięcia w formie fragmentu koła o głębokościach 2 mm i długościach (po cięciwie) około 10 mm. W osiach o przeciętnym (akceptowalnym) tłumieniu fal wady te były z łatwością wykrywane ze znacznym zapasem wzmocnienia. Pokazany układ głowic wykonano w Pracowni Badań Nieniszczących IPPT w końcu lat 80-tych na zlecenie Instytutu Metalurgii Żelaza. Celem badań było wykrywanie wad na czopie o na przedpiaściu głowicami sprzęganymi do walcowej części przedpiaścia. Podobne układy głowic można również zaprojektować do wykrywania wad w innych fragmentach osi.

Późniejsze badania prowadzone przez pracowników IMŻ wykazały, że podobną wykrywalność wad uzyskano stosując głowice kątowe na fale poprzeczne.

Z przeglądu literatury i doświadczeń wynika, że możliwości wykrywania wad standardowymi głowicami, wyposażonymi w jedno lub dwa przetworniki piezoelektryczne, z użyciem jednokanałowej aparatury ultradźwiękowej są ograniczone. Możliwe jest budowanie układów głowic do badania od czola osi, z powierzchni walcowych czy podobnych do opisanych układów głowic dla różnych osi. Jednak ze względu na różnice geometryczne osi, dla każdej z nich powinien powstać oddzielny układ. Natomiast zastosowanie głowic wieloelementowych umożliwiających formowanie wiązki fal (podobnie jak to opisano w pracy 1) umożliwia badanie różnych osi tym samym (wielokrotnie jednak droższym) układem pomiarowym z lepszą wykrywalnością.



Rys. 7. Układ czterech głowic sprzęganych do przedpiaścia, wykrywających wady na czopie i przedpiaściu.

4. Literatura

- 1 S. Avramidis, D. Yan, D. Liaptsis, S. Michau, A. Ngyendinh, Ultrasonic modelling to design a phased array probe for the testing of railway solid axles from the end face, praca powstała w ramach projektu AxleInspect (dostępna w Internecie)
2. G. Hottowy, R. Jawor, Wykrywanie pęknięć zmęczeniowych metodą ultradźwiękową w osiach pojazdów szynowych, mat. XVII Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane 8-11 marca 2008, str. 125
3. R. Bawolski, E. Chmiel, C. Skibika, Z. Świdorski (praca zbiorowa): Defektoskopowe badanie elementów pojazdów szynowych. WKŁ Warszawa 1979.
4. J. Szelażek, p. Grzywna, p. Gutkiewicz, S. Mackiewicz, Zjawiska wpływające na wykrywalność pęknięć zmęczeniowych w eksploatacyjnych badaniach ultradźwiękowych osi kolejowych, mat. XVIII Seminarium Nieniszczące badania materiałów, Zakopane, 13-16 marca 2012, str. 37-49
- 5 J. Szelażek, Sposób wykrywania wad materiałowych i uszkodzeń w przedmiotach walcowych o wielostopniowych średnicach oraz przyrząd do ultradźwiękowych badań przedmiotów walcowych. Patent Nr 151652, 991.
- 6 G. Hottowy, Możliwości wykrywania pęknięć zmęczeniowych w osiach pojazdów szynowych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal transformowanych, mat. XIX Seminarium Nieniszczące badania materiałów, Zakopane, 12-15marca 2013, str.171-195
- 7 J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990.