

---

**XVIII Seminarium  
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW  
Zakopane, 13-16 marca 2012**

---

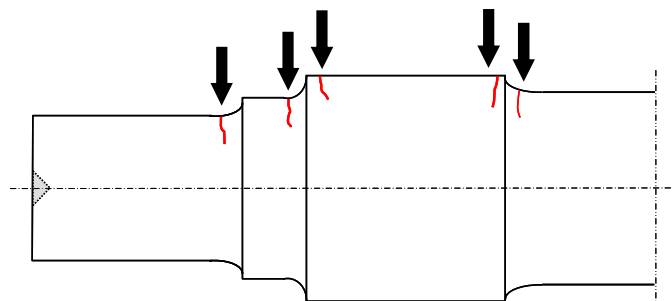
**ZJAWISKA WPLYWAJĄCE NA WYKRYWALNOŚĆ PĘKNIĘĆ  
ZMĘCZENIOWYCH W EKSPLOATACYJNYCH BADANIACH  
ULTRADŹWIĘKOWYCH OSI KOLEJOWYCH.**

Jacek SZELAŹEK, Paweł GRZYWNA  
Piotr GUTKIEWICZ, Sławomir MACKIEWICZ  
wszyscy IPPT PAN, Warszawa

[jszela@ippt.gov.pl](mailto:jszela@ippt.gov.pl) [grzywna@ippt.gov.pl](mailto:grzywna@ippt.gov.pl) [pgutkie@ippt.gov.pl](mailto:pgutkie@ippt.gov.pl), [smackiew@ippt.gov.pl](mailto:smackiew@ippt.gov.pl)

### 1. WSTĘP

Celem okresowych badań eksploatacyjnych osi kolejowych jest wykrycie pęknięć jakie mogły pojawić się na ich powierzchniach. Choć osie zaprojektowane są jako elementy o nieskończonej wytrzymałości zmęczeniowej, w niektórych z nich w czasie eksploatacji rozwijają się pęknięcia zmęczeniowe. Pęknięcia takie, o ile wcześniej nie wykryte, prowadzą po pewnym czasie do zniszczenia osi a nawet do katastrofy. Typowe miejsca, w których najczęściej pojawiają się pęknięcia zmęczeniowe są znane i pokazane na rysunku 1.



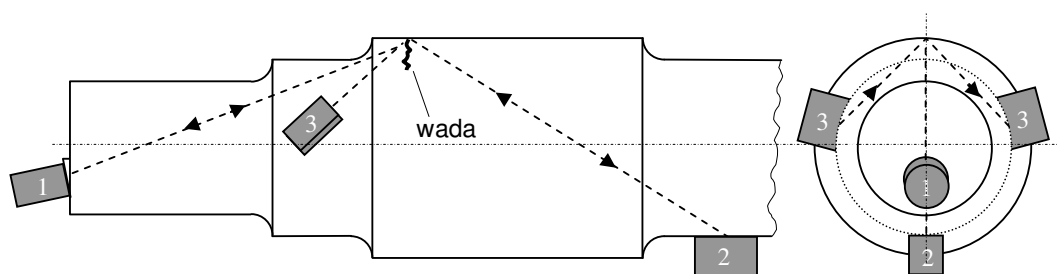
Rys. 1. Miejsca pojawiania się pęknięć zmęczeniowych na powierzchniach osi kolejowych (z pracy [1]).

Miejscami narażonymi na powstawanie pęknięć są przejścia ze średnicy mniejszej na większą oraz miejsca, gdzie na osi osadzone są koła (podpiałca), tarcze hamulcowe lub koła napędowe czy łożyska. To, że pęknięcia pojawiają się w miejscach o największych przekrojach, jak podpiałca, wynika ze złożonego stanu naprężeń panującego w tych miejscach. Wtłoczone na osie koła wywierają na materiał osi obciążenia wynikające z wcisku i tarcia oraz dodatkowo przenoszą na osie dynamiczne obciążenia powstające w czasie jazdy. Do wykrywania pęknięć stosuje się najczęściej jedną (lub obie) z następujących technik ultradźwiękowych:

- metoda 1 - badania falami podłużnymi wprowadzanymi od czoła osi,
- metoda 2 - badania falami poprzecznymi, głowicami kątowymi sprzęganymi do powierzchni walcowych osi

Poza tymi dwiema technikami, w roku 1987 zaproponowano wykrywanie pęknięć metodą przepuszczania (metoda 3), dwiema głowicami kątowymi ustawionymi na części walcowej osi [2]. Wszystkie trzy sposoby badania pokazane są schematycznie na rysunku 2.

Jak widać zarówno w metodzie 1 jak i 2 droga fali od głowicy do wady jest znaczna (rzędu kilkudziesięciu cm), co oznacza znaczny spadek ciśnienia akustycznego fali padającej na wadę. Dla obydwu metod odległość głowica-wada wielokrotnie przekracza długość pola bliskiego głowicy. Najkrótszą drogę do wady pokonują fale podczas badania metodą 3.



Rys. 2. Sposoby badań ultradźwiękowych osi kolejowej.

Metoda 1, czyli badanie głowicami fal podłużnych z powierzchni czołowej uznawana jest w literaturze za „zgrubny” sposób badania. Jej ogromną zaletą jest jednak możliwość wykonywania badań kontrolnych na osiach zamontowanych w wagonach, bez potrzeby wywiązywania zestawów kołowych lub oczyszczania walcowych fragmentów środkowej części osi. Do jej wad należy natomiast zaliczyć to, że wykrywane wady znajdują się w znacznych odległościach od głowicy, dostępna powierzchnia przesuwu głowic po czole czopa jest ograniczona (przez otwory na śruby i nakiełek) a przede wszystkim przez fakt, że efekt odbicia od naroża jest dla fal podłużnych znacznie słabszy niż dla fal poprzecznych.

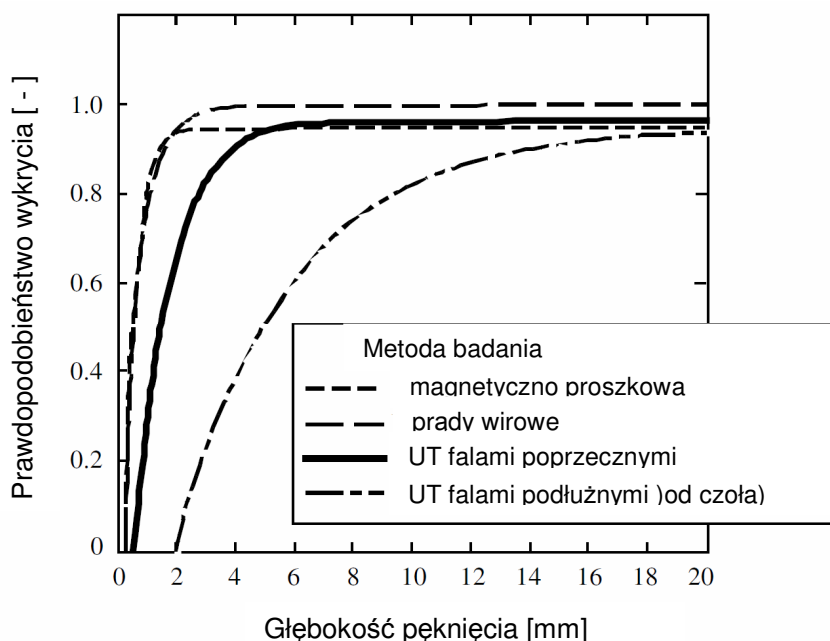
Metoda 2 uznawana jest za metodę „dokładną”, pozwalającą wykryć małe wady ale wymagającą znacznych nakładów pracy na przygotowanie osi do badania (wywiązywanie zestawów kołowych, demontaż łożysk, oczyszczanie powierzchni). Również przy tej metodzie badania wykrywane wady leżą w odległościach znacznie większych od długości pola bliskiego głowicy.

Metoda 3 była dotychczas testowana jedynie na próbkach osi z wadami sztucznymi. Zastosowanie w tej metodzie pary specjalnych głowic pozwalają na wykrywanie wad z maksymalnym ciśnieniem akustycznym (wada znajduje się w odległości zbliżonej do długości pola bliskiego głowicy).

Poza badaniami ultradźwiękowymi osie badane są często metodą magnetyczno-proszkową a czasem także metodą prądów wirowych i metodą penetracyjną. Trzy wymienione metody powierzchniowe pozwalają na wykrywanie pęknięć zmęczeniowych rozwijających się od dostępnych fragmentów powierzchni osi nie nadają się jednak do wykrywania wad na powierzchniach osi zakrytych przez piasty kół, tarczę hamulcową czy koło napędowe.

W pracach [3, 4] pokazano zależność prawdopodobieństwa wykrycia pęknięcia różnymi metodami w funkcji jego głębokości. Z wykresu pokazanego na rysunku 3 wynika, że prawdopodobieństwo wykrycia wady metodą ultradźwiękową, falami podłużnymi wprowadzanymi od czoła osi (metoda 1), jest najniższe. Dlatego też w badaniach eksploatacyjnych osi prowadzonych na zestawach kołowych wymontowanych z wózków najczęściej stosowana jest metoda 2, wykorzystująca dopasowane do krzywizny osi głowice kątowe fal poprzecznych wprowadzające wiązkę z walcowej powierzchni osi. Są to na ogół głowice klasyczne jednak coraz częściej stosowane są w tym celu wielopretwornikowe

głowice kątowe sterowane fazowo (*phased array*). Technika ta umożliwia również wykrywanie wad w miejscach takich jak podpięcie, miejsce osadzenia tarczy hamulcowej czy koła napędowego, niedostępnych dla metod powierzchniowych.

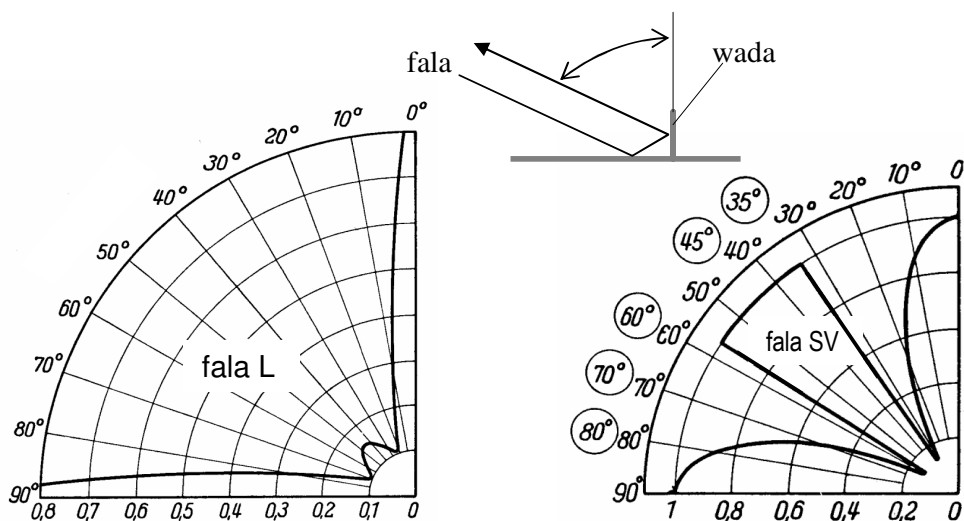


Rys. 3. Prawdopodobieństwo wykrycia pęknięcia osi w zależności od techniki badania i głębokości pęknięcia (z pracy [3]).

Metodą ultradźwiękową wady wykrywa się dzięki zjawisku odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni nieciągłości jaką jest wada. W przypadku pęknięć zmęczeniowych wychodzących od powierzchni, fala odbija się od naroża utworzonego przez zewnętrzną, cylindryczną powierzchnię osi i w przybliżeniu prostopadłą do niej powierzchnię pęknięcia. Jest to tzw. efekt narożnikowy polegający na dwukrotnym odbiciu się fali ultradźwiękowej od prostopadłych powierzchni (patrz rys. 4), w wyniku czego fala zostaje skierowana w kierunku, z którego została wysłana.

Współczynnik odbicia fal ultradźwiękowych od naroża zależy zarówno od typu fali jak też od jej kąta padania. Na rys. 4 pokazano teoretyczne zależności współczynników odbicia fal poprzecznych typu SV oraz fal podłużnych od idealnego naroża prostokątnego obliczone dla fali płaskiej [5]. Odpowiadają one, z dobrym przybliżeniem, rzeczywistym współczynnikom odbicia wiązek fal wytwarzanych przez standardowe głowice ultradźwiękowe od rzeczywistych pęknięć zmęczeniowych pod warunkiem, że stosowana długość fali jest znacznie mniejsza od wysokości pęknięcia ( $\lambda \ll h$ ) oraz, że powierzchnia pęknięcia jest, w przybliżeniu, prostopadła do powierzchni osi. W przypadku badania osi kolejowe typowe częstotliwości głowic zawierają się w zakresie od 2 do 4 MHz co oznacza, że długości fal poprzecznych wynoszą od 0,8 do 1,6 mm zaś fal podłużnych od 1,5 do 3 mm. Można więc przyjąć, że w praktyce obowiązują one dla pęknięć o wysokości powyżej 5 mm. Z zależności tych wynika, że dla fali podłużnej padającej na naroże pod kątami od  $15^\circ$  do  $75^\circ$  (są to kąty odpowiadające kątom wprowadzania fal podłużnych przy badaniach od czoła osi) współczynnik odbicia od naroża wynosi nie więcej niż 0,15. Dla fali poprzecznej SV, w zakresie stosowanych w badaniach osi kątów głowic, współczynnik odbicia od naroża jest zawsze równy 1 (praktycznie 100% odbicie). Są to wartości współczynników odbicia dla przypadków gdy obie powierzchnie tworzące naroże pęknięcia są gładkimi powierzchniami

swobodnymi, tj. odbicia następują na granicach stal-powietrze. Niezależnie od tego, że rzeczywiste pęknięcia zmęczeniowe osi warunki te spełniają jedynie w przybliżeniu z wykresów tych wynika kilka bardzo ważnych wniosków.



Rys. 4. Kątowe zależności współczynników odbicia fali poprzecznej i podłużnej od naroża prostokątnego. Wykresy obliczone teoretycznie dla idealnego naroża prostokątnego [5].

Najważniejszy z nich jest taki, że fale poprzeczne wprowadzane z powierzchni bocznych pod kątami w zakresie od 33° do 57° będą odbijać się od naroży pęknięć zmęczeniowych znacznie lepiej niż fale podłużne wprowadzane pod kątem z czoła osi. Najgorsze warunki odbicia fal podłużnych od naroża występują dla kątów wprowadzenia fali w zakresie od 20° do 30°. Są to kąty, które w praktyce, bywają często stosowane w badaniach eksploatacyjnych prowadzonych od czoła osi.

Nie są to jedyne ograniczenia fizyczne występujące przy badaniach eksploatacyjnych mających na celu wykrywanie pęknięć zmęczeniowych osi. Jak już wspomniano pokazane na rys. 4 wykresy współczynnika odbicia zakładają, że oba odbicia fali w narożu zachodzą od powierzchni swobodnych. Sytuacja taka faktycznie zachodzi w przypadku odbicia fal od nacięć kalibracyjnych wykonanych na osi wzorcowej. W przypadku rzeczywistych pęknięć zmęczeniowych zarówno powierzchnia samego pęknięcia jak i powierzchnia zewnętrzna osi w pobliżu pęknięcia nie muszą być powierzchniami swobodnymi. Boczna powierzchnia pęknięcia może być obciążona powierzchnią przeciwległą z uwagi na naprężenia ściskające zamykające pęknięcie (powstające np. w wyniku obciążenia osi ciężarem wagonu), natomiast powierzchnia boczna osi może być obciążona przylegającą powierzchnią piasty koła lub bieżni łożyska. Współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni obciążonej może być znacznie mniejszy niż od powierzchni swobodnej. Ponieważ amplituda echa wady wykrywanej metodą ultradźwiękową jako naroże jest zależna od iloczynu współczynników odbicia od obydwu powierzchni oznacza to, że współczynniki odbicia od rzeczywistych pęknięć osi, w warunkach badań eksploatacyjnych, będą znacznie mniejsze niż wynikałoby to z przedstawionych wykresów teoretycznych a także znacznie mniejsze niż współczynniki odbicia uzyskiwane od nacięć tej samej wysokości wykonanych na osiach wzorcowych. Sytuacja jest tutaj wyraźnie inna niż w przypadku wykrywania typowych wad wewnętrznych (np. pęcherze, pustki, wtrącenia) dla których amplituda echa ultradźwiękowego praktycznie nie zależy od obciążenia powierzchni zewnętrznej czy też stanu naprężeń w objętości materiału.

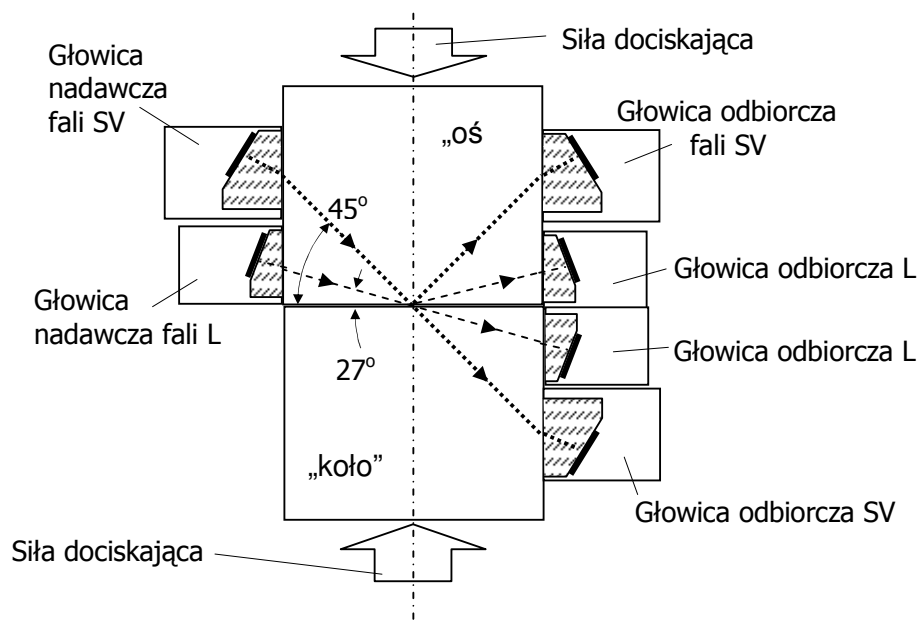
Znane są zależności współczynników odbicia fal ultradźwiękowych od stykających się powierzchni stalowych próbek w zależności od przyłożonego obciążenia i wywołanego nim

plastycznego „dopasowywania” się nierówności ściskanych powierzchni [6]. Pokazują one, że dla fal padających prostopadle na granicę próbek frezowanych, w wyniku działania ciśnienia rzędu 500 MPa, współczynnik odbicia fali podłużnej może spaść do wartości 0,7 a fali poprzecznej do wartości jedynie 0,4. Dla powierzchni piaskowanych spadki te są jeszcze większe a współczynniki odbicia wynoszą odpowiednio do 0,3 dla fali podłużnej i 0,19 dla fali poprzecznej. Oznacza to, że w zależności od chropowatości powierzchni i ciśnienia obciążającego styk odbicie fal od naroża o określonej wielkości może znacznie się zmienić. Celem pracy było zbadanie jak zachowują się współczynniki odbicia fal ultradźwiękowych padających ukośnie na granicę stal-stal przy zmianach obciążenia tej granicy naprężeniem ściskającym. Przeprowadzone badania miały na celu doświadczalne zasymulowanie i zbadanie zależności wpływających na wykrywalność pęknięć zmęczeniowych powstających w podpiąściach oraz czopach osi, które w praktyce wykrywane są metodami wykorzystującymi odbicie fal od naroża w warunkach obciążenia bocznej powierzchni osi.

## 2. BADANIA ODBICIA I PRZENIKANIA FAL PRZEZ GRANICĘ STYKU STAL - STAL

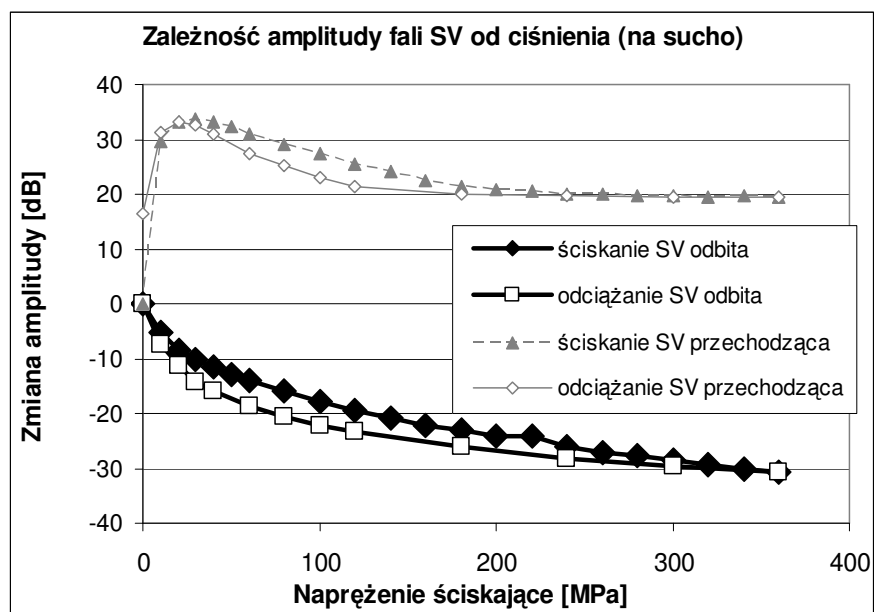
Do badań wybrano układ próbek imitujący warunki wykrywania wad w osiach kolejowych dwiema typowymi technikami: falą podłużną wprowadzaną od czoła osi pod kątem około  $26^\circ$  i falą poprzeczną wprowadzaną z powierzchni bocznej osi pod kątem  $45^\circ$ . Schemat badania pokazano na rysunku 5. Podstawową różnicą między stykiem podpiąścia osi i piasty koła kolejowego, które kontaktują się powierzchniami cylindrycznymi o promieniu około 90 mm, a zastosowanym układem doświadczalnym jest to, że badane próbki stykały się powierzchniami płaskimi. Jednak fakt, że promień krzywizny osi jest wielokrotnie większy od długości stosowanych fal ultradźwiękowych oraz od szerokości wiązki powodują, że odstępstwo to nie wpływa zasadniczo na uzyskane zależności.

Próbki, jedna imitująca oś i druga imitująca nałożone na nią koło, wykonano ze stali R7, stosowanej w produkcji kół monoblokowych. Chropowatość stykających się powierzchni wynosiła  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$  czyli była zbliżona do chropowatości podpiąścia nowej osi. Wymiary stykających się powierzchni wynosiły  $30 \times 18 \text{ mm}$  a wymiary przetworników

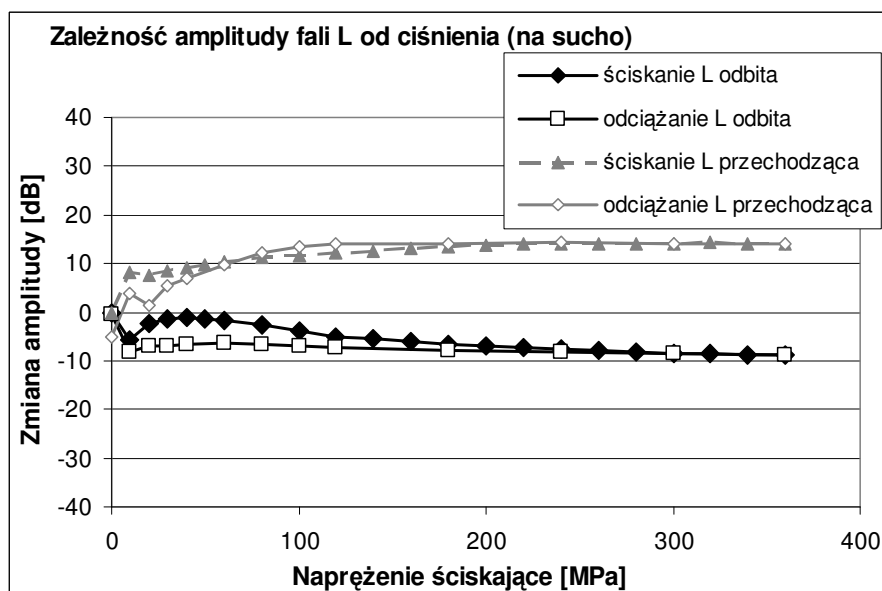


Rys 5. Schemat badania zależności współczynników odbicia i przenikania od ciśnienia panującego na granicy stal-stal.

piezoelektrycznych głowic około 6\*6 mm. Próbki ustawione były w maszynie wytrzymałościowej i poddane statycznemu ścisnaniu. Przyklejone do próbek specjalne, miniaturowe głowice kątowe na fale podłużne i poprzeczne miały częstotliwości około 3 MHz. Przeprowadzone badania pozwoliły na obserwację zmian współczynników odbicia i przenikania fal przez granicę próbek, w funkcji ciśnienia. Wykresy na rysunkach 6 i 7 pokazują zmiany amplitud fali poprzecznej i podłużnej odbitej od suchej granicy ściskanych próbek stalowych.



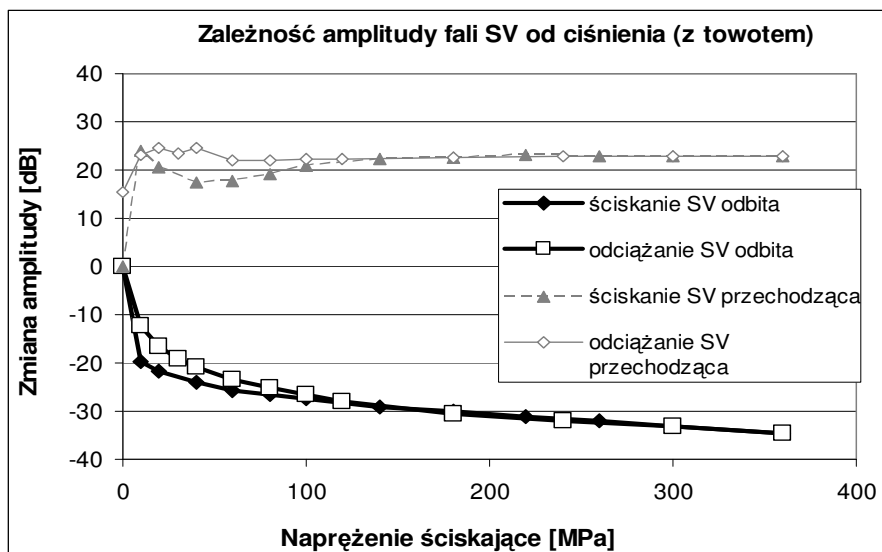
Rys. 6. Zmiany amplitudy fali poprzecznej (SV 45°) odbitej i przechodzącej przez powierzchnię styku próbek stalowych, ściskanie na sucho.



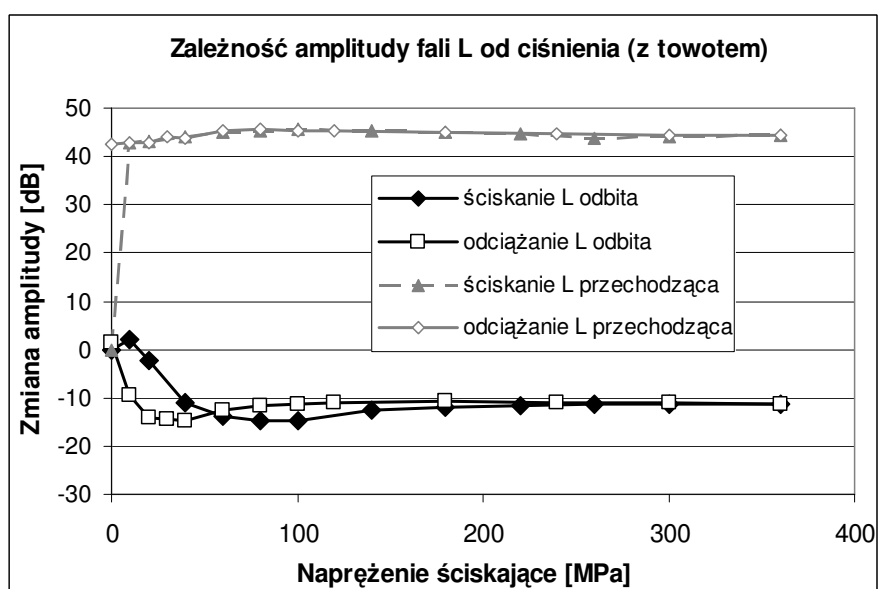
Rys. 7. Zmiany amplitudy fali podłużnej (L 26°) odbitej i przechodzącej przez granicę próbek stalowych, ściskanie na sucho.

Widoczny jest ciągły, monotoniczny spadek amplitudy fali poprzecznej odbitej od granicy próbek. Spadek amplitudy tej fali, dla ciśnienia równego 360 MPa wynosi aż 30dB. Dla fali podłużnej padającej pod małym kątem na powierzchnię styku próbek, ciśnienie o wartości 360 MPa wywołuje spadek amplitudy fali odbitej o 9 dB. Na wykresach pokazano również zmiany amplitudy fali przechodzącej przez powierzchnię styku próbek. Widoczne są nieliniowe zależności dla fali poprzecznej (gwałtowny wzrost amplitudy dla niskich ciśnień i nieznaczny spadek amplitudy dla wyższych ciśnień). Dla podłużnej fali przechodzącej przez granicę amplituda monotonicznie rośnie ze wzrostem ciśnienia.

Wykresy na rysunkach 8 i 9 pokazują podobne zależności zmierzone dla próbek ściskanych o powierzchni pokrytej towotem.



Rys. 8. Zmiany amplitudy fali poprzecznej (SV 45°) odbitej od granicy i przechodzącej przez granicę próbek, ściskanie z towotem między próbkami.



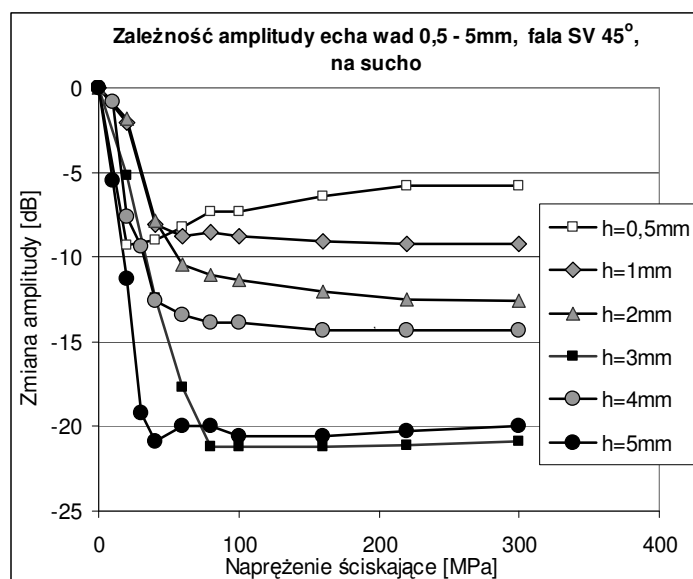
Rys. 9. Zmiany amplitudy fali podłużnej (L 26°) odbitej od granicy i przechodzącej przez granicę próbek, ściskanie z towotem między próbkami.

Smar na powierzchni styku próbek miał imitować rzeczywisty stan styku osi i koła, które nakładane jest na oś pokrytą warstwą smaru redukującego tarcie. Widoczny jest silniejszy, wynoszący ok. 34 dB spadek amplitudy fali poprzecznej odbitej od granicy próbek i 10 dB spadek amplitudy odbitej fali podłużnej. Zmienia się również charakter krzywych. Wyraźne spadki amplitudy fal odbitych zachodzą przy znacznie niższych ciśnieniach niż w przypadku próbek suchych. Wystarcza ok. 40 MPa naprężeń ściskających aby amplituda odbitych fal poprzecznych spadła o 20 dB zaś fal podłużnych o 10 dB. Drugim ważnym wnioskiem wynikającym z przedstawionych wykresów jest pojawianie się silnej fali przechodzącej już dla naprężeń ściskających rzędu 20 MPa. Potwierdza to możliwość łatwego przenikania fal przez granicę oś-koło lub oś-bieżnia łożyska i w konsekwencji możliwość powstawania dodatkowych ech kształtu wskutek odbić od powierzchni bocznych tych nasadzonych na oś elementów.

### 3. BADANIA WYKRYWALNOŚCI MAŁYCH WAD POD PIASTĄ KOŁA

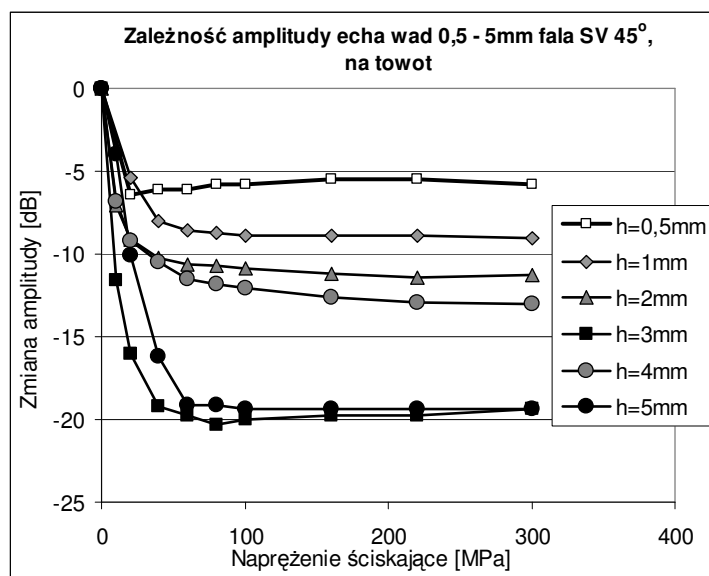
Następnym etapem badań było sprawdzenie jak kontakt między osią i nałożonym na nią kołem wpływa na wykrywalność wad sztucznych imitujących pęknięcia rozwijające się na podpiąściu, w obszarze styku osi z kołem. W tym celu w pokazanych na rysunku 4 próbkach wykonano metodą elektroiskrową nacięcia imitujące pęknięcia rozwijające się od powierzchni osi. Nacięcia miały szerokość około 0,4 mm, i wychodziły prostopadłe od powierzchni próbki. Dla nacięć o różnych głębokościach przeprowadzono pomiary zależności wysokości echa uzyskiwanego od nacięcia w funkcji naprężenia ściskającego między powierzchnią próbki z nacięciem (imitującą oś) a powierzchnią próbką bez nacięcia (imitującą piastę koła). Zbiorcze wyniki tych pomiarów pokazano na rysunkach 10 i 11.

Rysunki 10 i 11 pokazują spadki amplitudy echa od nacięć o głębokościach od 0,5 do 5mm wykrywanych falą poprzeczną wprowadzaną pod kątem 45° (typowy sposób stosowany wykrywania pęknięć zmęczeniowych w podpiąściu).



Rys. 10. Spadek amplitudy echa od wad typu nacięcie w funkcji naprężenia ściskającego na powierzchni styku przy badaniu falą poprzeczną o kącie 45°. Pomiary wykonane na próbkach suchych.





Rys. 11. Spadek amplitudy echa od wad typu nacięć w funkcji naprężenia ściskającego na powierzchni styku przy badaniu falą poprzeczną o kącie  $45^\circ$ . Pomiary wykonane na próbkach pokrytych smarem.

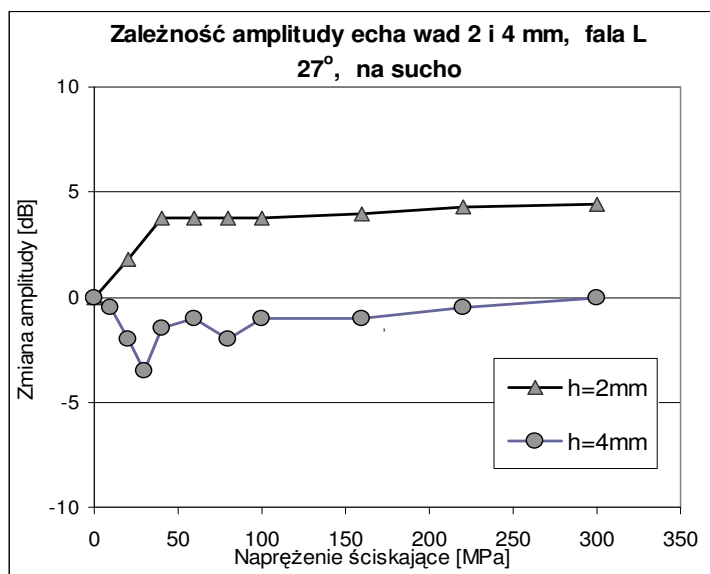
Widoczny jest brak jednoznacznej zależności funkcji spadku amplitudy echa od głębokości wady zarówno dla suchej jak i pokrytej towotem powierzchni styku. Maksymalny spadek (ok. 20 dB) zaobserwowano dla nacięcia o głębokości 5 mm ale jedynie nieznacznie niższy dla wady o głębokości 3mm. Z kolei dla nacięcia o głębokości 4 mm zanotowano spadek wynoszący tylko 14 dB. Wynikać to może z niepowtarzalnych warunków odbicia fali (chropowatość i lokalne zmiany ciśnienia na powierzchni styku) od różnych nacięć w czasie eksperymentu. Wada sztuczna wykrywana była dwiema głowicami fal poprzecznych, „patrzącymi” na nią z obu stron (głowice nadawcza i odbiorcza SV na rysunku 4). Linie pokazane na wykresach to wartości średnie uzyskane z dwóch głowic. Maksymalna różnica wskazań między tymi głowicami, zaobserwowana podczas eksperymentu dla wady o głębokości 1 mm, wynosiła 8 dB. Pokazuje to w dużym stopniu warunki styku na granicy oś-koło mogą wpływać na amplitudę echa uzyskiwanego od tej samej wady.

Niezależnie od obserwowanego rozrzutu wyników występuje jednak wyraźna tendencja, że spadek wysokości echa wskutek obciążenia powierzchni próbki jest tym większy im większa jest głębokość wady. Dla nacięcia o głębokości 5mm i ciśnienia na styku powyżej 50 MPa spadek ten osiąga wartość 20 dB natomiast dla nacięcia o głębokości 1 mm wynosi tylko ok. 8 dB.

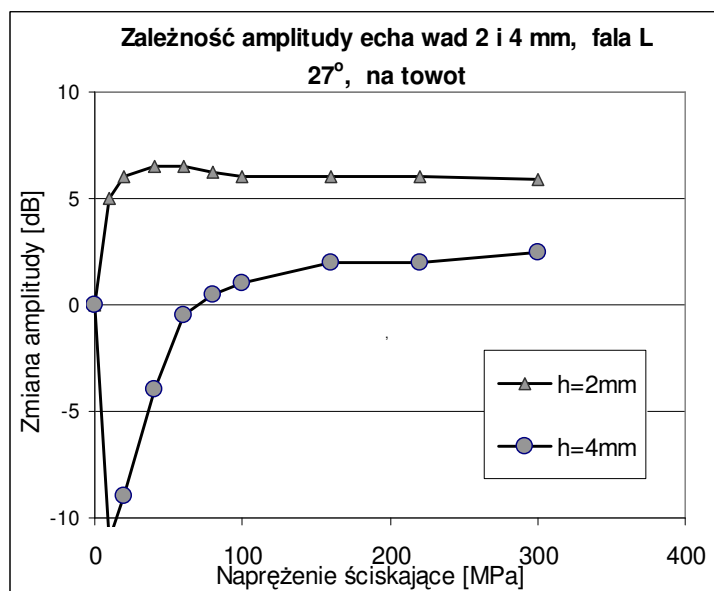
Zupełnie inaczej zmieniają się, w funkcji obciążenia powierzchni styku, amplitudy ech od wad typu nacięć w przypadku stosowania fali podłużnej wprowadzanej pod kątem  $26^\circ$  (patrz rysunki 12 i 13). Nieco zaskakującym efektem jest tutaj fakt, że dla dużych naprężeń ściskających obserwuje się nawet pewien wzrost amplitudy echa uzyskiwanego od wady. Widać to szczególnie dla płytszego nacięcia o głębokości 2 mm porównywalnej z długością stosowanej fali. Efekt ten jest dość trudny do wytłumaczenia można jednak wskazać na pewne zależności, które mogą prowadzić do jego wystąpienia. Po pierwsze efekt odbicia od naroża dla fal podłużnych jest z zasady bardzo słaby (patrz rys. 4) i „odbicie” od płytkiego nacięcia ma w tym przypadku bardziej charakter dyfrakcyjnego rozproszenia fali padającej na niejednorodności niż dwukrotnego geometrycznego odbicia od powierzchni naroża. W takim przypadku obecność swobodnej powierzchni próbki w pobliżu nacięcia nie tylko, że nie wzmacnia fali „odbitej” ale może nawet powodować jej osłabienie, poprzez zjawisko silnej

transformacji padającej fali podłużnej na falę typu poprzecznego. W tym przypadku silne dociśnięcie powierzchni styku likwiduje swobodną powierzchnię próbki w pobliżu nacięcia i tym samym zmniejsza utratę energii fali podłużnej. W rezultacie zwiększa się także amplituda fali podłużnej odbitej (rozproszonej wstecznie) od nacięcia.

Efekt „wzmocnienia” amplitudy fali odbitej od nacięcia przez silny docisk powierzchni styku zanika przy wzroście głębokości nacięć. Wynika to z faktu, że dla głębszych nacięć wzrasta rola efektu geometrycznego odbicia od naroża, dla którego brak obciążenia powierzchni styku jest korzystny.



Rys. 12. Spadek amplitudy echa wady wykrywanej falą podłużną od głębokości wady i ciśnienia na styku. Pomiary na próbkach suchych.



Rys. 13. Spadek amplitudy echa wady wykrywanej falą podłużną od głębokości wady i ciśnienia na styku. Pomiary na próbkach pokrytych towotem.

Równie interesujący i trudny do wytłumaczenia jest efekt gwałtownego zaniku amplitudy fali odbitej obserwowany dla nacięcia 4 mm przy niewielkich wartościach naprężeń ściskających występujący w przypadku gdy powierzchnia styku pokryta jest towotem (patrz rys. 13). Efekt ten ma prawdopodobnie związek z silnym tłumieniem fali ultradźwiękowej w warstwie kontaktowej powodowanym przez tarcie wewnętrzne w warstwie smaru. Przy niewielkich naprężeniach ściskających na powierzchni styku mogą występować poślizgi powodujące straty energii fali ultradźwiękowej. Przy zwiększeniu nacisku na styk ulega on usztywnieniu przez co poślizgi poprzeczne nie występują i w efekcie zmniejszają się straty energii fali w warstwie kontaktowej.

Porównując wykresy z rys. 10, 11, 12, 13 pokazujące spadki amplitud ech od nacięć w funkcji obciążenia powierzchni styku wyznaczone dla fal poprzecznych i podłużnych należy pamiętać, że poziomy ech uzyskiwanych falą poprzeczną są wielokrotnie większe (w stosunku do poziomemu szumów) niż ech uzyskiwanych falą podłużną. Oznacza to, że relatywnie mniejsza czułość fal podłużnych na obciążenie powierzchni styku, nie oznacza wcale ich większej przydatności do wykrywania pęknięć na obciążonych powierzchniach. W przypadku małego stosunku sygnał-szum nawet stosunkowo niewielki dodatkowy spadek amplitudy echa może bowiem całkowicie uniemożliwić wykrycie pęknięcia.

Z przedstawionych rezultatów wynika jednoznacznie, że amplituda ech ultradźwiękowych uzyskiwanych od wad typu pęknięć/nacięć wychodzących prostopadle od powierzchni jest silnie zależna od obciążenia tej powierzchni przez elementy przylegające (np. koła i bieżnie łożysk w przypadku osi kolejowych). W zależności od typu fali i głębokości pęknięcia spadek amplitudy echa wady wskutek obciążenia powierzchni może sięgnąć 20 dB co oznacza 10-krotny spadek wysokości echa w skali liniowej. Efekt ten jest relatywnie silniejszy w przypadku stosowania fal poprzecznych wprowadzanych pod kątem 45° z powierzchni bocznej osi niż w przypadku stosowania fal podłużnych wprowadzanych pod kątem 26° od czoła osi. W przypadku fal podłużnych może jednak wystąpić dodatkowy efekt gwałtownego spadku amplitudy echa fali odbitej (patrz rys. 13) występujący przy stosunkowo małym obciążeniu powierzchni styku (rzędu 10-20 MPa) w przypadku obecności na niej smaru.

Powyżej przedyskutowano wpływ obciążenia powierzchni osi kolejowych przez przylegające elementy konstrukcyjne na wykrywalność pęknięć zmęczeniowych znajdujących się pod tymi elementami. Należy jednak pamiętać także o drugim efekcie negatywnie wpływającym na wykrywalność pęknięć zmęczeniowych w eksploatacyjnych badaniach osi.

W przypadku prowadzenia badań eksploatacyjnych osi bez wywiązywania zestawów kołowych z wagonów lub lokomotyw są one obciążane momentem zginającym wywołanym silami nacisku na czopy łożyskowe (ciężarem pojazdu) i reakcją szyn, na których opierają się koła zestawu. Takie obciążenie osi powoduje, że w zależności od aktualnego położenia pęknięcie może być otwierane lub zamykane przez naprężenia występujące w jego otoczeniu. Stan naprężeń w obszarze pęknięcia i w konsekwencji to czy pęknięcie jest przez nie otwierane czy zamykane wpływa na współczynnik odbicia fal od jego powierzchni. W pracach [ 7 , 8 ], w których do wykrywania pęknięć zmęczeniowych stosowano fale powierzchniowe stwierdzono, że naprężenie zamykające świeże pęknięcie (bez produktów korozji) może powodować spadek współczynnika odbicia od jego powierzchni dochodzący do 40 dB. Podobne spadki współczynnika odbicia obserwowane mogą być również dla fal poprzecznych a nieco niższe dla fal podłużnych. Oznacza to, że przy niekorzystnym położeniu kątowym zestawu kołowego badanego pod wagonem niektóre pęknięcia mogą być zamykane przez naprężenia ściskające i wskutek tego dawać bardzo słabe echa ultradźwiękowe, nawet o kilkadziesiąt dB niższe niż w przypadku gdyby znajdowały się w strefie naprężeń rozciągających. Skuteczny sposób na uniknięcie tego groźnego problemu może polegać na powtórzeniu badania ultradźwiękowego osi po przetoczeniu wagonu o

odcinek równy połowie obwodu koła. Wskutek tego prostego zabiegu pęknięcia znajdujące się pierwotnie w strefie naprężeń ściskających znajdują się w strefie naprężeń rozciągających, w której ich echa ultradźwiękowe ulegną znacznemu podwyższeniu.

#### **4. WNIOSKI**

Wykonane badania modelowe oraz analiza zależności teoretycznych pozwalają stwierdzić, że wykrywanie pęknięć zmęczeniowych w ultradźwiękowych badaniach eksploatacyjnych osi kolejowych jest zadaniem stosunkowo trudnym i obciążonym sporym ryzykiem niewykrycia nawet stosunkowo głębokich pęknięć. Problem ten dotyczy szczególnie pęknięć zmęczeniowych rozwijających się pod nałożonymi na oś elementami takimi jak koło, tarcza hamulcowa czy pierścień łożyska. Amplituda echa od tam usytuowanej wady zależy bowiem nie tylko od jej długości i głębokości ale również od obciążenia oraz innych charakterystyk powierzchni styku osi i przylegającego do niej elementu. Generalnie, efekt osłabienia echa wady wzrasta ze wzrostem obciążenia powierzchni styku i jest relatywnie silniejszy dla pęknięć o większej głębokości. W badaniach prowadzonych za pomocą głowic fal podłużnych od czoła osi dodatkowy efekt osłabienia amplitudy echa od pęknięć może wystąpić także przy stosunkowo małych wartościach naprężeń kontaktowych (10-20 MPa) w przypadku gdy powierzchnia styku osi z nasadzonym elementem pokryta jest smarem lub innym ośrodkiem ułatwiającym poślizg kontaktujących się powierzchni.

Drugim efektem mogącym negatywnie wpłynąć na wykrywalność pęknięć w badaniach eksploatacyjnych „pod wagonem” jest efekt „zamykania się” pęknięć wskutek naprężeń ściskających wywołanych obciążeniem osi przez ciężar wagonu lub lokomotywy. W przypadku świeżych pęknięć zmęczeniowych spadek amplitudy echa wskutek zamykania pęknięcia może znacznie przekroczyć 20 dB. Problem ten można jednak skutecznie ograniczyć powtarzając badanie osi po przetoczeniu wagonu o połowę długości obwodu koła. Przeprowadzona analiza wskazuje, że nastawianie czułości badania na wadach sztucznych w postaci nacięć na „gołych” osiach wzorcowych nie gwarantuje wykrycia rzeczywistych pęknięć zmęczeniowych o tej samej głębokości w osiach zmontowanych zestawów kołowych. Różnice w amplitudach ech ultradźwiękowych wynikające z różnych warunków odbicia fal od wad umiejscowionych na swobodnej powierzchni i wad znajdujących się pod elementami nasadzonymi na oś mogą, w skrajnym przypadku, sięgać kilkudziesięciu dB. Oznacza to, że niebezpieczne wady mogą pozostać niewykryte pomimo prawidłowego nastawienia czułości badania oraz starannego wykonania badania przez operatora.

Prawdopodobnie nie da się całkowicie wyeliminować występowania takich przypadków, można jednak próbować zminimalizować zasygnalizowany problem przez dobre przygotowanie instrukcji badań oraz odpowiednie wyszkolenie operatorów. Podstawowe znaczenie ma tutaj precyzyjne dostosowanie techniki badania (kątów i częstotliwości głowic oraz kierunków wprowadzania fal) do geometrii oraz stopnia demontażu osi. W szczególności należy mieć pełną świadomość ograniczeń narzucanych przez prawa odbicia fal od naroży (patrz rys. 4) oraz efektów osłabienia ech ultradźwiękowych od pęknięć powierzchniowych powodowanych przez obciążenie powierzchni osi przez nasadzone na nią elementy.

#### **LITERATURA**

---

- [1] R. Bawolski, E. Chmiel, Cz. Skibika, Z. Świdorski (praca zbiorowa): Defektoskopowe badanie elementów pojazdów szynowych. WKŁ Warszawa 1979.

- 
- [2] J. Szelażek, Ultrasonic Detection of Cracks in Wheel Set Axles, NDT International, 1987, vol. 20, No 3, pp. 177-180
- [3] U. Zerbst, K. Madler, H. Hintze, Fracture mechanics in railway applications—an overview, Engineering Fracture Mechanics 2005, Vol. 72, pp. 163–194
- [4] U. Zerbst, M. Schödel, H.Th. Beier, Parameters affecting the damage tolerance behaviour of railway axles, Engineering Fracture Mechanics 2011. Vol. 78, pp. 793–809
- [5] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, Werkstoffprüfung mit Ultraschall, Sprinter-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1966
- [6] G. Starzyński, J. Szelażek., S. Mackiewicz, Badania współczynnika odbicia i sztywności kontaktowej powierzchni chropowatych przy pomocy fal ultradźwiękowych, Mat. Seminarium Szkoleniowego „Badania Nieniszczące”, Zakopane, 9-12marca 2010, str. 53-66.
- [7] S. Vanlanduita, P. Guillaumea, G. Van Der Linden, On-line monitoring of fatigue cracks using ultrasonic surface waves, NDT&E International 36 (2003) 601–607
- [8] K. Harri, P. Guillaumes, S. Vanlanduit, On-line Monitoring of Cracks Rusing Ultrasonic “Multisine” Surface Waves, Proc. ECNDT 2006 - Th.1.5.3 (<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.1.5.3.pdf>)

