

# Nieciągłości wzorcowe w badaniach ultradźwiękowych osi kolejowych

## Calibration reflectors in ultrasonic testing of railway axles

### Streszczenie

W referacie omówiono zagadnienia związane z nieciągłościami wzorcowymi stosowanymi w badaniach eksploatacyjnych osi kolejowych. Wykonano przegląd norm krajowych oraz zagranicznych i procedur pod kątem głębokości nacięć wzorcowych i ich rozmieszczenia. Przeprowadzono analizę wykrywalności falami ultradźwiękowymi nieciągłości w zależności od ich głębokości. Omówiono korelację pomiędzy wielkościami nacięć (pęknięć) a czasem propagacji wady prowadzącej do urwania osi. Omówiono wpływ grubości nacięć wzorcowych na możliwości ich wykrywania metodą ultradźwiękową.

**Słowa kluczowe:** osie kolejowe; ultradźwięki; nieciągłości wzorcowe

### Abstract

Paper discusses the issues related to calibration reflectors used in ultrasonic testing of railway axles during operation. National and international standards and procedures were reviewed in relation to depth of the calibration reflectors and their location. An analysis of ultrasonic detection of reflectors according to their depth was performed. The correlation between the size of the reflectors (cuts, cracks) and propagation time of the defect leading to break off of railway axis was discussed. The influence of model cut thickness on possibilities of ultrasonic detection was discussed.

**Keywords:** railway axles; ultrasonic; calibration reflectors

### Wstęp

Zestawy kołowe są elementami taboru kolejowego, którym poświęca się szczególną uwagę. Zakłady utrzymania taboru ponoszą olbrzymie koszty związane z produkcją, eksploatacją, naprawami i badaniami osi i kół. Cena awarii spowodowanych pękniętymi osiami lub kołami są bowiem wielokrotnie wyższe. Ponadto każde takie zdarzenie to zagrożenie dla zdrowia i życia ludzkiego. Przepisy utrzymania ruchu powinny więc zapewniać wychwycenie mikroskopijnej ilości osi wadliwych lub potencjalnie wadliwych z setek tysięcy osi poruszających się po torach Unii Europejskiej. Dziwi więc, że przepisy dotyczące jednej z najczęściej stosowanych metod NDT – metody ultradźwiękowej UT – pozwalają na ogromną dowolność sposobu wykonywania badań, częstości ich wykonywania oraz interpretacji wyników. Punktem wyjściowym rozważań na temat skuteczności instrukcji i procedur badań jest analiza wielkości nieciągłości wzorcowych, ich położenia i możliwości wykrywania.

### Głębokość nacięć wzorcowych a normy i procedury

Jedyna norma obowiązująca w Polsce zawierająca informacje dotyczące badań ultradźwiękowych taboru kolejowego to PN EN 15313. W punkcie 6.5.7 dotyczącym badań nieniszczących czytamy: "Non-destructive tests shall be carried out to detect any defects on overhauled parts. Certain tests may be carried out in-service. The method to be used for carrying out these tests shall be indicated in the maintenance plan" (Badania nieniszczące należy wykonywać w celu wykrycia wszystkich defektów w remontowanych elementach. Niektóre badania można wykonać w eksploatacji. Metoda, którą należy użyć w tych badaniach, powinna być wskazana w planie utrzymania). Dla porównania niemiecka norma DIN 27201-7 w tablicy I zawiera wytyczne niepozostawiające wątpliwości.

Brak analogicznych przepisów w Polsce doprowadził do sytuacji, w której poziom bezpieczeństwa zapewniany przez różne zakłady utrzymania ruchu są nieporównywalne.

Mgr inż. Piotr Machała, mgr inż. Patryk Uchroński – ZBM ULTRA Sp. z o.o., mgr inż. Sebastian Darsznik – Urząd Transportu Kolejowego, dr inż. Jarosław Mierzwa – Politechnika Wroclawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [piotr.machala@ultra.wroclaw.pl](mailto:piotr.machala@ultra.wroclaw.pl)

Tablica II zawiera porównanie norm i procedur używanych w Polsce pod kątem głębokości nacięć i zasad skalowania podczas badań UT osi pełnych.

## Szerokość nacięcia

Podczas spotkania mającego na celu wymianę informacji i doświadczeń z firmą Werkstoff Service z Essen (odpowiedzialną za przepisy VPI) zwrócono nam uwagę, że oprócz głębokości nacięć wpływ na wynik kalibracji głowic może mieć szerokość wykonania nacięcia. Kwestia ta została podjęta, ponieważ ZBM ULTRA sp. z o.o. na przygotowujących przez siebie wzorcach osi wykonuje nacięcia specjalnie skonstruowanym przyrządem opartym o szlifierkę kątową, Werkstoff Service natomiast wykorzystywał metodę elektrodrążenia. Nacięcia wykonywane przez ZBM ULTRA

ma grubość 1,5 mm i jest wykonane przez cięciwę, a elektrodrążone 0,5 mm i długość 10 mm. Wyniki kalibracji na obu tych nacięciach różnią się. Zgodnie z zasadami rozchodzenia się fal ultradźwiękowych grubość nacięcia nie ma znaczenia, różnice w skalowaniach wynikają z innych przekrojów nacięć (rys. 1). Nacięcia wykonane metodą elektrodrążenia są cieńsze niż przekrój wiązki ultradźwiękowej, fala nie zostaje więc odbita w całości. W celu określenia ilościowego tych różnic przygotowano wzorec wykonany z wałka i posiadający nacięcia wykonane dwoma metodami w tej samej odległości i o tej samej głębokości. Aby mieć pewność, że użyta aparatura nie miała wpływu na wyniki analizy, wykorzystano system badania (rys. 2) oparty o defektoskop CUD BO WiFi i głowicę ultradźwiękową o kącie wprowadzania wiązki 19° umieszczoną w tarczy głowic ultradźwiękowych (rozchodzenie się wiązki fal ultradźwiękowych zgodnie z analizą geometryczną przedstawiono na rys. 3).

**Tablica I.** Wymogi normy DIN 27201-7  
**Table I.** The requirements of DIN 27201-7

Typ osi	Metoda badania	Kąt rozchodzenia się fali	Kierunek rozchodzenia się fali	Progi (wartości informacyjne)
Oś drążona	UT	Przynajmniej jeden kąt (najkorzystniej 45°) (w przypadku wykrycia wady potwierdzenie pod drugim kątem)	2 kierunki („do przodu” i „do tyłu”)	Reflektor porównawczy o głębokości 2 mm (prostopadle do osi osi) + 12 dB
Oś pełna	UT	Badanie głowicami normalnymi 0°, 2 zasięgi obserwacji (1000 mm i 2500 mm)	2 kierunki prostopadłe	Echo ściany tylnej +12 dB
	UT	Rozchodzenie się fali ukośne (37° do 54°)	1 kierunek (ewentualnie 2 kierunki)	Reflektor porównawczy o głębokości 2 mm (prostopadle do osi osi) + 6 dB
wszystkie typy osi	MT	–	–	wskazanie linearne 2 mm

**Tablica II.** Porównanie wymogów badań UT osi pełnych różnych norm i procedur  
**Table II.** Comparison of UT axis testing requirements full of different standards and procedures

Lp.	Numer normy	Tytuł normy	Minimalna głębokość nacięcia	Maksymalna głębokość nacięcia	Ilość nacięć	Poprawka kalibracji
1	PN EN 15313	Kolejnictwo – Wymagania eksploatacyjne dotyczące obsługi zestawów kołowych – Utrzymanie zestawów kołowych pojazdów w eksploatacji i wyłączonych z eksploatacji	Brak wymagań			
2	DIN 27201-7	Stan pojazdów kolejowych – podstawy i technologie wykonania. Część 7: badania nieniszczące	2 mm	2 mm	brak danych	+ 6 dB
3	BN-75 3518-02 Arkusze 01	Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych elektrycznych zespołów trakcyjnych 3000 V	2 mm	15 mm	6	0
4	BN-77 3518-02 Arkusze 04	Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych w wagonach eksploatowanych	2 mm	8 mm	5	0
5	4249/22	Instrukcja CNTK badań defektoskopowych osi zestawów kołowych dla lokomotyw serii SM48, SM31, SM42, EM10, EU/EP07, ET22, ET41, ET42 oraz osi wzorcowych tych serii	1,0 mm	17,5 mm	od 6 do 14	0
6	3660/22	Instrukcja technologiczna wykonywania badań ultradźwiękowych osi zestawów kołowych wagonów towarowych Instytutu Kolejnictwa	2,6 mm	14,0 mm	9	0
7	IBU	Instrukcje badań stworzone przez ZBM ULTRA	2 mm	2 mm	≥ 5	0 lub +6 dB

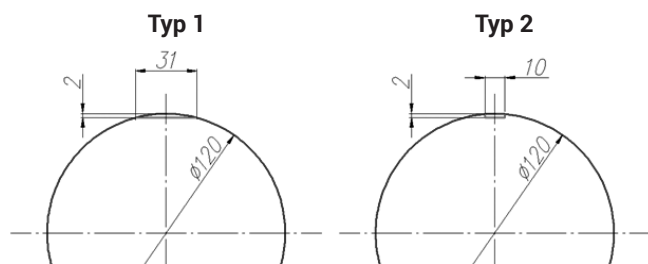
Częstotliwość głowicy – 4 MHz, średnica przetwornika – 25 mm. Zrzuty ekranu (wyniki badań) umieszczono na rysunku 4.

Echo na 80% wysokości ekranu w przypadku nacięcia elektrodrążonego uzyskano przy wzmacnieniu 47 dB, a naciętego szlifierką kątową przy wzmacnieniu 43 dB. Różnica jest więc znaczna, mogąca mieć wpływ na prawidłową ocenę ewentualnych wskazań badanej osi. Wynika stąd wniosek,

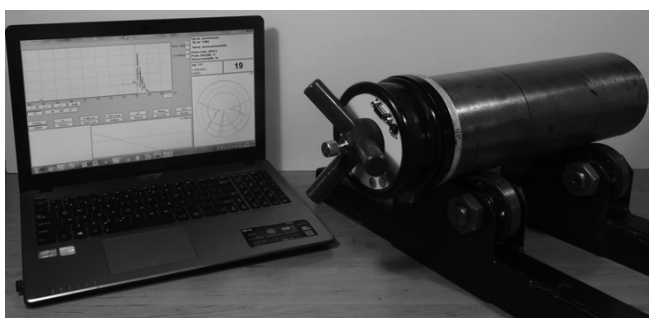
że oprócz głębokości nacięcia autor normy lub procedury powinien podać metodę wykonania nacięć wzorcowych. W przeciwnym razie wyniki badań wykonane na podstawie dwóch różnych kalibracji będą ze sobą nieporównywalne.

## Wpływ głębokości nacięć na wykrywalność

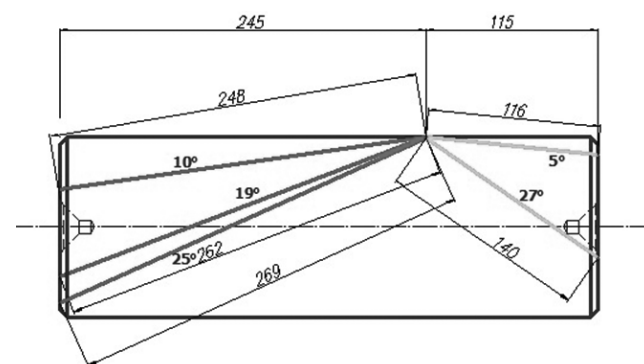
Wykorzystując również defektoskop CUD BO WiFi przeprowadzono analizę wpływu głębokości nacięcia na wysokość echa ultradźwiękowego. W tym celu wykonano z wykorzystaniem szlifierki kątovej, nacięcia w tej samej odległości, o głębokościach: 0,5; 1; 2; 3; 4; 8; 16 mm. Maksymalne echa uzyskane od tych nacięć ustawiono na 80% WE i zapisano wzmacnienia. Badania wykonano pięcioma głowicami o różnych kątach wprowadzania wiązki – schemat przedstawiono na rysunkach 5. Głowice 5° i 27° zostały ustawione tak, że droga rozchodzenia się fal ultradźwiękowych jest wyraźnie mniejsza niż dla pozostałych głowic. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy III. Wykonano również kalibrację głowicami ręcznymi z powierzchni bocznej walca o kątach zgodnych z wytycznymi VPI do badań osi towarowych: 37°, 45°, 54°.



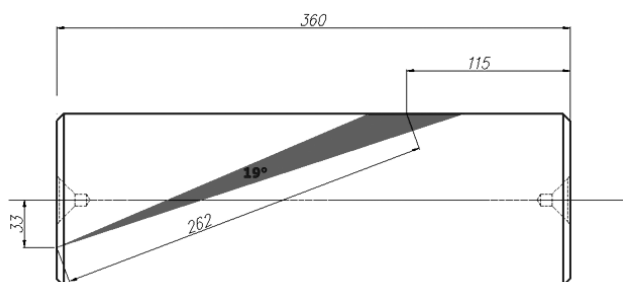
Rys. 1. Przekroje nacięć  
Fig. 1. Cross-section of calibration reflectors



Rys. 2. Defektoskop CUD BO WiFi  
Fig. 2. CUD BO WiFi flaw detector

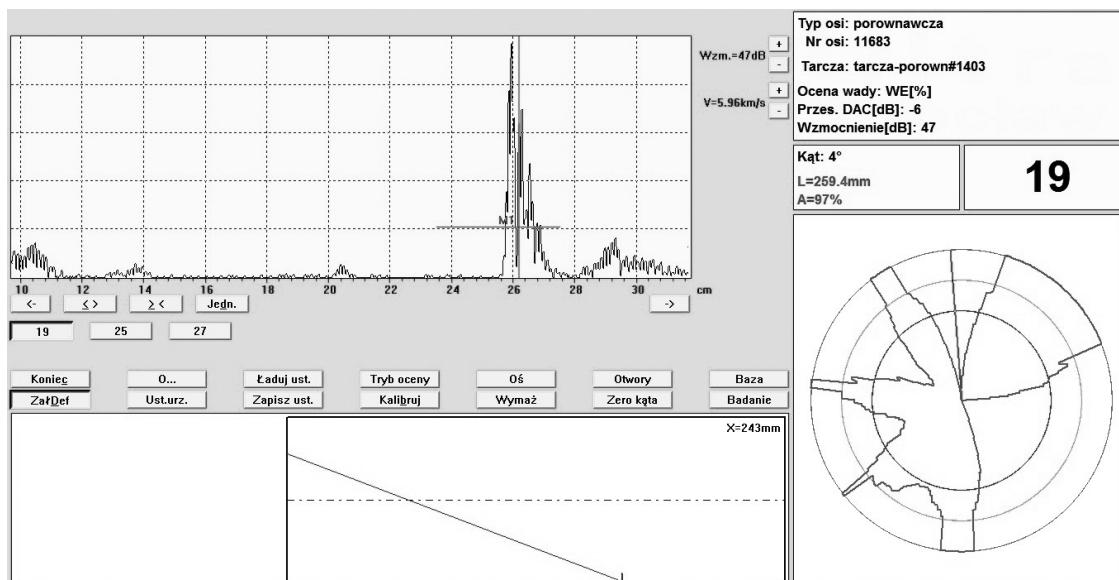


Rys. 5. Schemat rozchodzenia się fal ultradźwiękowych użytych głowic  
Fig. 5. Scheme of wave propagation of used probes



Rys. 3. Schemat rozchodzenia się wiązki fal o kącie 19°  
Fig. 3. 19° ultrasonic wave propagation

Z tego prostego doświadczenia wynika, że dla głowic 10°, 19° i 25° (których odległość od nacięć bardziej przypomina wielkości rzeczywiste) echo odbite od nacięcia o głębokości 3 mm nie różni się znacznie od ech uzyskanych od nacięć głębszych. Oznacza to, że wartość 3 mm głębokości nacięcia jest dla wykorzystanego układu wadą typu nieskończoność. Zwiększanie głębokości ponad tą wartość nie powoduje więc zwiększania czułości badania.



Rys. 4. Wyniki badań  
Fig. 4. Test results

Tablica III. Wyniki kalibracji na nacięciach o różnej głębokości  
Table III. Calibration results on incisions of different depths

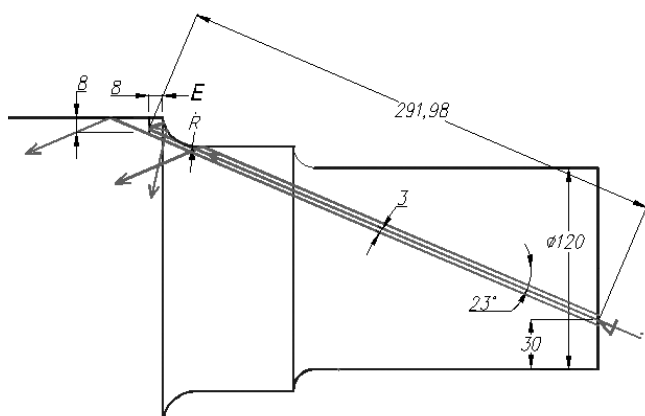
Lp.	Głębokość nacięcia	Kalibracja od czoła przy użyciu tarczy głowic					Kalibracja z powierzchni bocznej przy użyciu głowic ręcznych		
		5°	27°	10°	19°	25°	37°	45°	54°
1	0,5 mm	45 dB	50 dB	51 dB	49 dB	54 dB	30 dB	62 dB	77 dB
2	1 mm	35 dB	46 dB	45 dB	46 dB	50 dB	22 dB	58 dB	61 dB
3	2 mm	32 dB	46 dB	39 dB	43 dB	47 dB	23 dB	54 dB	56 dB
4	3 mm	29 dB	52 dB	35 dB	34 dB	40 dB	21 dB	50 dB	50 dB
5	4 mm	24 dB	52 dB	35 dB	34 dB	40 dB	21 dB	47 dB	49 dB
6	8 mm	18 dB	47 dB	34 dB	33 dB	39 dB	18 dB	48 dB	42 dB
7	16 mm	16 dB	40 dB	33 dB	33 dB	39 dB	18 dB	46 dB	38 dB

Powstaje więc pytanie, dlaczego autorzy niektórych norm i procedur zdecydowali się na wykorzystanie do skalowań nacięć powyżej wartości granicznej. Nacięcia te wykorzystywane w czasie badań z części czołowej czopa znajdują się w dużej odległości lub znajdują się w cieniu akustycznym. Można domniemywać, że wymagania te powstały w wyniku praktycznych prób – w obszarach szczególnie niebezpiecznych (w pobliżu zmian średnic) wykonywano nacięcia coraz głębsze aż do uzyskania wystarczającego poziomu detekcji. Wyjaśnienie tego zjawiska podano w kolejnym rozdziale.

## Badania obszarów w cieniu ultradźwiękowym

Nacięcia wzorcowe wykonuje się w celu wprowadzenia reflektora ultradźwiękowego do badanego układu. Wiązka fal rozchodząca się w materiale trafia na narożnik, od którego następuje odbicie. Na rysunku 6 przedstawiono analizę geometryczną rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w osi towarowej o średnicy czopa  $\varnothing 120$  mm podczas próby kalibracji na nacięciu E o głębokości 8 mm zgodnie z normą BN-77 3518-02 Arkusz 04.

Narożnik nacięcia znajduje się w cieniu akustycznym. Skąd więc pochodzi echo, które jest otrzymywane przez operatorów w czasie kalibracji od ponad 30 lat? To odbicie od górnej części nacięcia i naroża przejścia podpięcia-predpięcia (schemat na rys. 7).

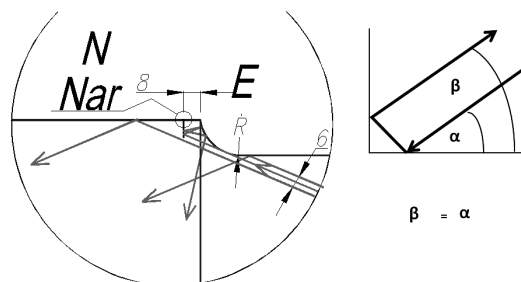


Rys. 6. Kalibracja na nacięciu E zgodnie z BN-77 3518-02 Arkusz 04  
Fig. 6. Calibration on the E incision according to BN-77 3518-02 -Sheet 04

Powstaje pytanie na ile badania prowadzone są w ten sposób i czy wykrywanie nieciągłości o głębokościach kilku lub nawet kilkunastu milimetrów jest wystarczające, aby zapobiec awariom spowodowanym pęknięciami osi. Odpowiedzi na to pytanie należałoby szukać w raportach z występujących w Europie awarii. Na podstawie analiz można ustalić jak duża była nieciągłość od której pęknięcie zaczęło propagować i jak szybko to postępowało. Niestety z przyczyn prawnych taka ogólnodostępna baza wiedzy nie istnieje. Autorzy norm i procedur muszą się więc opierać na swoim doświadczeniu i dostępnym im możliwościach technicznych. W momencie powstawania norm branżowych były one zupełnie inne niż obecnie, należy więc przeprowadzić dyskusję w środowisku czy w związku z obecnym poziomem aparatury ultradźwiękowej nie należałoby zupełnie zrezygnować ze stosowania norm branżowych. W tym momencie trudno wskazać na bardziej kompletne przepisy, dlatego jako rozwiązanie obligatoryjne można by przyjąć wymagania niemieckie – głębokość nacięcia niezależnie od miejsca występowania to 2 mm. Zasadne jest jednak pytanie o to, czy kryterium nie jest zbyt ostre lub zbyt łagodne.

## Nacięcie 2 mm

Autorzy referatu zadali podmiotowi odpowiedzialnemu za normę DIN 27201-7 – odpowiednikowi UTK w Niemczech Eisenbahn-Bundesamt – pytanie dotyczące genezy sformułowania wymogu stosowania nacięcia o głębokości 2 mm. Odpowiedź uzyskaliśmy od Pana Berndta Wicke z działu 32 (referat 32) Eisenbahn-Bundesamt odpowiedzialnego za monitorowanie pojazdów (Überwachung Fahrzeuge) stacjonującego w Bonn.



Rys. 7. Szczegółowa analiza odbicia od nacięcia E  
Fig. 7. Detailed reflection analysis from the E incision

Powodem wskazania w normie DIN27201-7 nacięcia o głębokości 2 mm jest przekonanie, że aktualnie technologia pozwala na wiarygodne wykrycie tego typu nieciągłości. Ponadto zwrócono nam uwagę, że kolumna zawierająca wielkości nieciągłości nieakceptowalnych ma charakter informacyjny, a nie obligatoryjny.

Uzyskaliśmy również informację, że Komitet Techniczny CEN / TC 256 / SC 2 / WG 11 przygotowuje europejską normę dotyczącą wymagań badań nieniszczących elementów kolejowych w eksploatacji. Ma ona mieć numer EN 16910. Jej pierwsza część ma być poświęcona zestawom kołowym i nie posiadać tabeli z zawartymi nieciągłościami nieakceptowalnymi.

W odpowiedzi na nasze zapytanie nie wskazano normy, w której określono by rozmieszczenie nacięć kalibracyjnych na osi. Ich umiejscowienie wynika z doświadczeń i wiedzy projektantów i producentów osi oraz położenia wcześniej występujących awarii. Podano przykład przepisów Deutsche Bahn i VPI dotyczących badań osi wagonów towarowych. Rozmieszczenie nacięć w obu tych dokumentach jest takie samo i wprost wynika z doświadczeń i występujących najczęściej pęknięć osi.

Potwierdzeniem informacji przesłanych przez Pana Berndta Wicke jest rozróżnienie w kalibracji podczas badań osi pełnych i drążonych. Podczas kalibracji osi pełnej do otrzymanej

wartości wzmocnienia należy dodać 6 dB, a w czasie kalibracji osi drążonej 12 dB. Ze względu na to, że badania osi drążonych wykonuje się układami automatycznymi i zapewnione są bardzo dobre, niezmiennie warunki sprzęgania echa uzyskane podczas badań wzorców charakteryzują się wysokim stosunkiem sygnału użytecznego do szumu. Rzeczywiste badania osi zabudowanych charakteryzują się zwiększeniem poziomu szumu pochodzącego od pierścieni łożysk, silnika, hamulców itp. Wówczas kryterium nacięcia 2 mm + 12 dB jest zbyt ostre, ponieważ pojawiają się szumy.

Kryterium 2 mm, szczególnie w czasie badań od części czołowej czopa jest wymaganiem ostrym. Przy wykorzystaniu nieodpowiedniej aparatury lub w wyniku nieumiejętnego prowadzenia badania ewentualne wskazanie może zginąć w szumie lub dobra oś może zostać odrzuca ze względu na złe ocenienie wskazania pozornego. Paradoksalnie więc bardziej wiarygodne wyniki badań mogłyby zostać uzyskane w następstwie zastosowania nacięcia głębszego.

Badania ultradźwiękowe są wykonywane regularnie w całej Europie, mimo to ciągle dochodzi do awarii spowodowanych pęknięciami zmęczeniowymi osi. Być może propagacja pęknięć następuje więc na tyle szybko, że wykrywanie pęknięć o głębokości 2 mm jest niewystarczające lub okres pomiędzy badaniami jest zbyt długi.

---

## Podsumowanie

Producenci osi i aparatury ultradźwiękowej, zakłady utrzymania ruchu, operatorzy badań, autorzy procedur, ośrodki szkoleń i odpowiednie urzędy przywiązują ogromną wagę do jakości wykonywanych badań. Dziwi więc fakt, że podstawowa kwestia dotycząca wielkości używanych podczas kalibracji, a nawet sposobu ich wykonania jest lekceważona lub bezrefleksyjnie przyjmowana. Dobór wielkości optymalnej mógłby zostać zaaprobowany i przyjęty tylko przy ścisłej współpracy wspomnianych podmiotów. Jest to wymóg konieczny, aby wyniki badań uzyskiwane przez różne zakłady były ze sobą porównywalne.

## Literatura

- [1] DIN 27201-7 Stan pojazdów kolejowych – podstawy i technologie wykonania. Część 7: badania nieniszczące.
- [2] PN EN 15313 Kolejnictwo – Wymagania eksploatacyjne dotyczące obsługi zestawów kołowych – Utrzymanie zestawów kołowych pojazdów w eksploatacji i wyłączonych z eksploatacji.
- [3] BN-75 3518-02 Arkusz 01 Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych elektrycznych zespołów trakcyjnych 3000 V.
- [4] BN-77 3518-02 Arkusz 04 Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych w wagonach eksploatowanych.
- [5] 4249/22 Instrukcja CNTK badań defektoskopowych osi zestawów kołowych dla lokomotyw serii SM48, SM31, SM42, EM10, EU/EP07, ET22, ET41, ET42 oraz osi wzorcowych tych serii.
- [6] 3660/22 Instrukcja technologiczna wykonywania badań ultradźwiękowych osi zestawów kołowych wagonów towarowych Instytutu Kolejnictwa.