

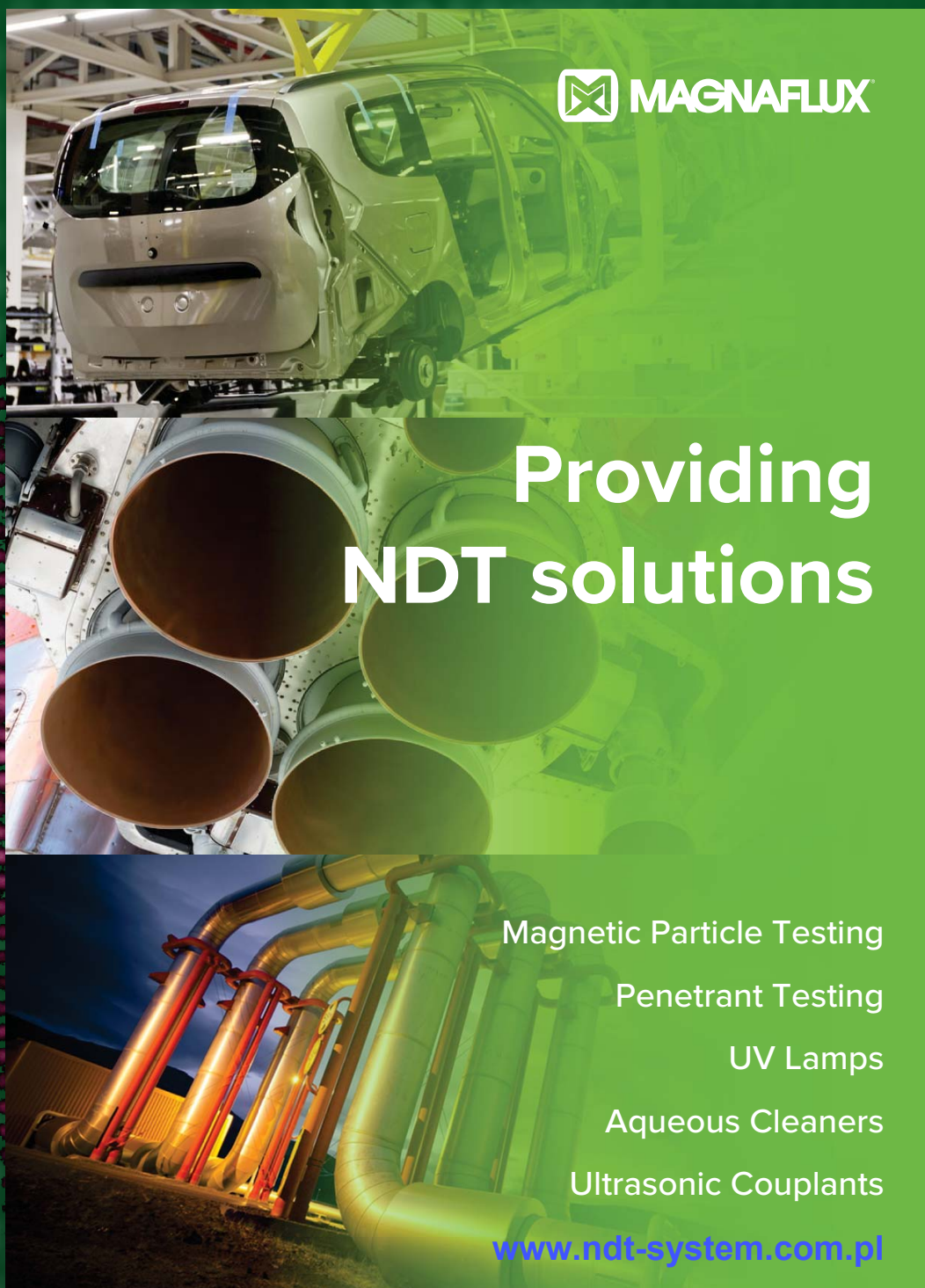
# Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

## 50. KKBN

[www.kkbn.pl](http://www.kkbn.pl)



 **MAGNAFLUX**

### Providing NDT solutions

- Magnetic Particle Testing
- Penetrant Testing
- UV Lamps
- Aqueous Cleaners
- Ultrasonic Couplants

[www.ndt-system.com.pl](http://www.ndt-system.com.pl)

## DXR75P-HR

### Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75  $\mu\text{m}$ , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
  - rurociągi transportowe
  - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
  - rury kotłowe
  - przewody paliwowe
  - rury ciśnieniowe
  - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

## DXR140P-HE

### Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
  - badanie korozji pod izolacją
  - pozycjonowanie zaworów
  - pomiar grubości ścianki
  - badanie podpór rurociągów
  - rury kotłowe
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
  - beton, mosty, podpory, ...
- **nauka, sztuka i archeologia**
- **kontrola linii energetycznych, kontrola GIS**





Badania Nieniszczące i Diagnostyka  
Agenda Wydawnicza SIMP  
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin  
e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl  
www.bnid.pl

## ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF  
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF  
Adam Sajek  
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD  
Jacek Grochowalski  
Ryszard Łukaszk

## REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY  
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH  
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ  
/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH  
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ  
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH  
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS  
Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA  
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*

Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*  
Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*

Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*

Dr Pierre Calmon, *CEA, France*

Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*

Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*

Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*

Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*

Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*

Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*

Inż. Sławomir Józwiak, *NDT Systems, Polska*

Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*

Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*

Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*

Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*

Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*

Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*

Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*

Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*

Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*

Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*

Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*

Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*

Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Valentin R. Skalsky, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Łukasiewicz – Górnos Śląski Instytut Technologiczny, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*

Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*

Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*

Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*

Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*

Prof. Gábor Vértesy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*

Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*

Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*

Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

# Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

## SPIS TREŚCI

## Adam Kondej, Dominik Kukla

Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych\* ..... 12

## Tomasz Katz

Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową\* ..... 17

## Piotr Bielawski

Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn\* ..... 25

## Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych\* ..... 30

## Alireza Akhlaghi

Porosity measurement in CFRP\* ..... 37

## Jerzy Kaszyński

Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz ..... 40

## Maciej Martyna, Roman Martyna

Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych\* ..... 48

## Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski

Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopów łopaty stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji\* ..... 56

## Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer

Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej\* ..... 62

## Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz

Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy\* ..... 67

## Mateusz Wróbel, Maciej Szwed

Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT\* ..... 72

## Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array\* ..... 80

## Karol Kaczmarek

Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych\* ..... 88

## Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat,

Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera  
Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore\* ..... 97

## Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka

Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal przewodzonych\* ..... 101

Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN ..... 105

Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja

Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45\* ..... 120

Informacje BNID - Wspomnienie o plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM ..... 124

Informacje dla Autorów i Czytelników ..... 125

\* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA  
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Tomasz Katz\*

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

# Modelowanie wykrywania wad kontaktowo-zmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową

## Modelling of detection of RCF defects in railroad rails by ultrasonic method

### STRESZCZENIE

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie sposobów modelowania wad kontaktowo-zmęczeniowych wykorzystując komercyjne i autorskie oprogramowanie komputerowe. Szczególną uwagę zwrócono na poznanie sposobu rozwoju wad kontaktowo-zmęczeniowych czego efektem jest poprawne modelowanie wad uwzględniające takie czynniki jak: lokalizacja wady, kierunek propagacji pęknięcia. Wynikiem końcowym prac było opracowanie parametrów serii głowic ultradźwiękowych, które będą efektywnie wykrywać wady kontaktowo-zmęczeniowe w szyna kolejowych.

**Słowa kluczowe:** UT; wady kontaktowo zmęczeniowe; modelowanie; szyny; oprogramowanie;

### ABSTRACT

The purpose of this paper is to present ways of modelling a RCF (rolling contact fatigue) defects using commercial and proprietary computer software. Particular attention was paid to learning how RCF's defects develop resulting in correct defect modeling taking into account such factors as defect location, crack propagation direction. The final result of the work was the development of parameters for a series of ultrasonic probes that will effectively detect RCF's defects in railroad rails.

**Keywords:** UT; RCF; modelling; rails; software

### 1. Wstęp

Rosnące wymagania w zakresie badań nieniszczących stawiane przez rozwój polskich kolei, a w szczególności czynniki takie jak wzrost prędkości i tonażu na szlakach kolejowych, wymagają odpowiednio wysokiej jakości badań eksploatacyjnych szyn, w szczególności wykrywania wad sklasyfikowanych w katalogu wad szyn UIC 712 R [1].

Nowoczesne badania nieniszczące szyn metodą ultradźwiękową powinny wykrywać, z większą niż dotychczas skutecznością, wady kontaktowo-zmęczeniowe szyn zlokalizowane w bocznych częściach główki szyny. Obecnie techniki badawcze stosowane na polskich kolejach nie wykrywają lub nie pozwalają na jednoznaczną identyfikację tego typu wad.

PLK S.A. dysponuje bogatą bazą danych dotyczących wyników diagnostyki i napraw szyn. Informacje te wskazują zagrożenia właściwe dla polskiej infrastruktury, co stanowi wytyczne do zaprojektowania zoptymalizowanego układu głowic ultradźwiękowych, zwiększającego szanse wykrycia wszystkich niebezpiecznych wad mogących prowadzić do awarii a nawet katastrof. Każde zdarzenie wynikające ze złego stanu technicznego szyn generuje olbrzymie koszty i jest zagrożeniem dla zdrowia i życia ludzkiego.

Zastosowanie komputerowej symulacji badań ultradźwiękowych umożliwi przeanalizowanie wpływu wielu czynników i parametrów głowic na skuteczność detekcji wad przy minimalizacji kosztów związanych z testowaniem

wielu prototypów głowic na rzeczywistych próbkach szyn z wadami sztucznymi i naturalnymi. Podejście takie pozwala to na wstępne przygotowanie zoptymalizowanych projektów głowic ultradźwiękowych do wykrywania określonych typów wad, które następnie można poddawać weryfikacji w badaniach doświadczalnych.

### 2. Aplikacje do modelowania wykrywania wad kontaktowo-zmęczeniowych

Do modelowania wykrywania wad zastosowano dwa typy oprogramowania komputerowego, którego interfejsy przedstawiono na rys. 1. Do określenia kierunku propagacji wiązek fal ultradźwiękowych w główce szyny w geometrii 3D oraz modyfikowania parametrów wiązki (długość pola bliskiego, rozbieżność) zastosowano oprogramowanie BeamTool [2]. Oprogramowanie to umożliwi pełne projektowanie i charakteryzowanie cech akustycznych głowicy oraz parametrów przetwornika wraz z linią opóźniającą. Dobra praktyka inżynierska zaleca także, aby proponowany model głowicy lub układ przetworników sprawdzić na sztucznych reflektorach odwzorowujących wady naturalne powstające w eksploatowanym torze. Program BeamTool ułatwia to zadanie pozwalając również na projektowanie próbek odniesienia z wadami sztucznymi.

Drugi program, SymUT jest używany do obliczeń rozkładu ciśnienia akustycznego w polu głowic ultradźwiękowych oraz amplitud ech ultradźwiękowych uzyskiwanych od reflektora modelowego w zależności od jego wielkości, położenia i orientacji. Standardowym poziomem odniesienia dla w/w obliczeń jest poziom amplitudy echa od reflektora

\*Autor korespondencyjny.

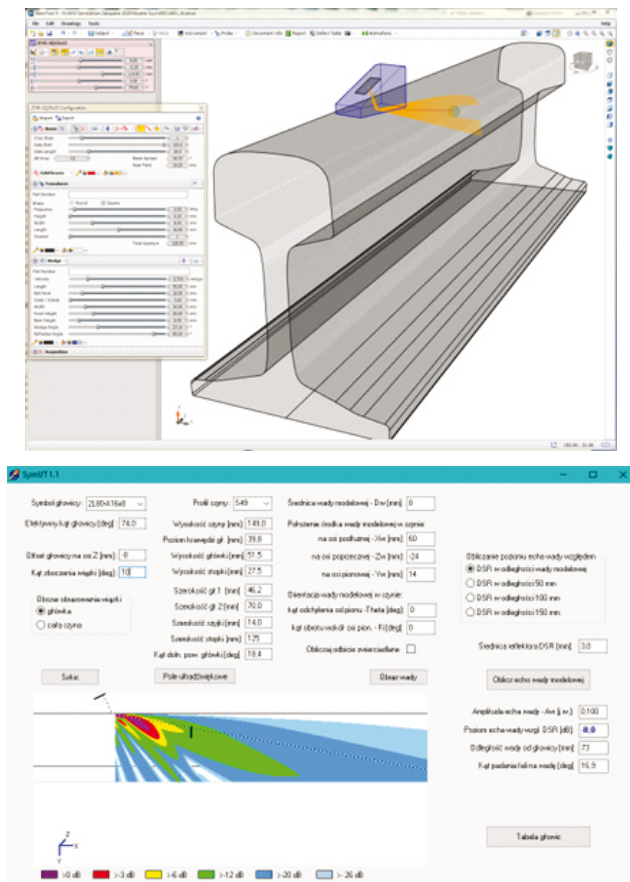
E-mail: tkatz@ippt.pan.pl



tarczowego DDSR = 3 mm usytuowanego na osi wiązki w tej samej odległości co wada modelowa. Jako reflektor modelowy odwzorowujący wady naturalne stosowany jest płaski dysk (reflektor tarczowy) o dowolnie określonej średnicy i orientacji, który można umieszczać w dowolnym miejscu modelowej szyny kolejowej. Oprogramowanie oblicza rozkład pola ultradźwiękowego (dokładniej rozkład ciśnienia akustycznego) modelowanej głowicy, wychodząc z podstawowej zasady Huygensa. Mówi ona, że ciśnienie akustyczne w punkcie pola określonym przez wektor  $\mathbf{r}$  jest sumą ciśnień kulistych fal cząstkowych wytwarzanych przez wszystkie punkty tworzące aktywną powierzchnię przetwornika. W izotropowym ośrodku propagacji dla fal mechanicznych zasada ta może być wyrażona w postaci całki Rayleigha:

$$p(\mathbf{r}) = \iint (p_0 e^{-ikr} / \lambda r) dS \quad (1)$$

gdzie:  $p$  jest ciśnieniem akustycznym w punkcie  $\mathbf{r}$ , sumowanie odbywa się po całej aktywnej powierzchni przetwornika;  $p_0$  jest ciśnieniem akustycznym na powierzchni przetwornika,  $k$  jest liczbą falową,  $\lambda$  to długość fali, zaś  $\mathbf{r}$  jest odległością między punktem  $\mathbf{r}$ , gdzie oblicza się ciśnienie akustyczne a bieżącym punktem integracji na powierzchni przetwornika.

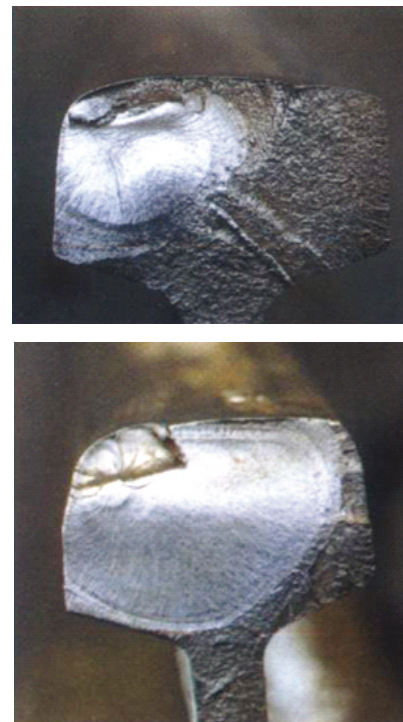


Rys. 1. Oprogramowanie BeamTool (lewe okno) oraz SymUT (prawe okno).

Fig. 1. BeamTool software (left window) and SymUT (right window).

### 3. Model wady typu pęknięcie poprzeczne pionowe (211)

Na podstawie analizy dotychczasowych wyników badań szyn określono najpierw najbardziej krytyczny typ wad kontaktowo-zmęczeniowych, które mogą być niemożliwe do wykrycia dotychczas stosowanymi technikami ultradźwiękowymi. Wada ta to pęknięcie poprzeczne pionowe postępujące w główce szyny (pęknięcie zmęczeniowe – 211 wg. Katalogu Wad). Wada ta rozwija się powoli od wewnętrznego wtrącenia lub rozwiniętej wady typu ang. Shelling lub ang. Head Checking i może pozostać niewykryta aż do czasu złamania szyny. Obecnie stosowane techniki badań ultradźwiękowych szyn nie są w stanie wykryć tej wady jeśli położona jest w bocznej części główki (patrz rys. 2). Strefa ta pozostaje poza obszarem przeszukiwania standardowych układów głowic, ustawionych na środku główki szyny i skierowanych wzdłuż jej osi. Rys. 2 przedstawia inicjator pęknięcia oraz charakterystyczną kolistą strefę rozwoju wady zmęczeniowej powstającej na skutek działania naprężenia rozciągającego wzdłuż osi szyny oraz sił pionowych powstających wskutek przejazdu pociągu.



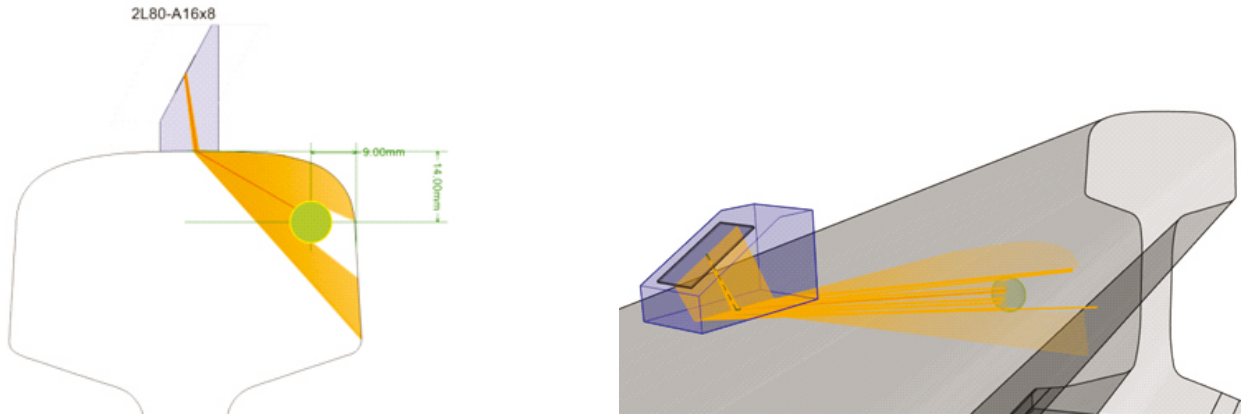
Rys. 2. Pęknięcie poprzeczne postępujące (pęknięcie zmęczeniowe) w różnych stopniach rozwoju.

Fig. 2. Transverse progressive cracking (fatigue cracking) in various stages of development.

Uwzględniając typowe charakterystyki w/w wad takie jak:

- położenie w objętości główki szyny;
- orientacja i kierunek propagacji;
- typowy kształt i wielkość;

stworzono szereg wad modelowych możliwie najlepiej odzwierciedlających wady rzeczywiste w kontekście badań ultradźwiękowych. Każda z wad modelowych uwzględnia istotne aspekty wad rzeczywistych, takie jak usytuowanie w

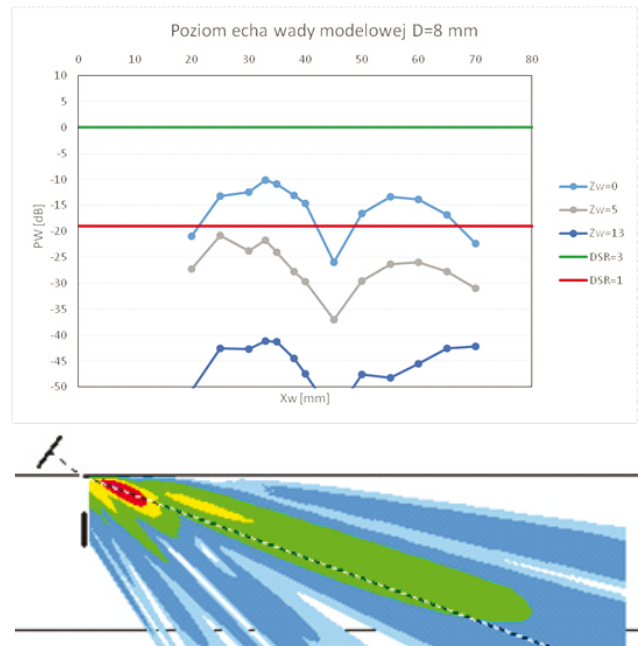


**Rys. 3.** Wizualizacja lokalizacji wady typu pęknięcie poprzeczne postępujące w główce szyny (pęknięcie zmęczeniowe).  
**Fig. 3.** Visualization of the location of a defect like a transverse crack progressing in the rail head (fatigue crack).

szynie, orientacja oraz wielkość. Modelowym odpowiednikiem wady (211) został reflektor w postaci płaskiego dysku o średnicy 8 mm o odpowiednio dobranej orientacji. Reflektor umieszczony został w modelu szyny w bocznej części główki, jak pokazano na rys. 3. Proces modelowania uwzględniał zmiany położenia oraz płaszczyzny odchylenia reflektora na osi poprzecznej oraz podłużnej.

W pierwszym etapie prac oszacowana została czułość badania dla standardowej głowicy fal poprzecznych z przetwornikiem kwadratowym o długości boku  $a=15\text{mm}$ , częstotliwości drgań przetwornika  $f=2\text{MHz}$  oraz kącie załamania  $\beta=70^\circ$ . Jest to jedna z głowic ultradźwiękowych zalecanych do badania szyn kolejowych w normie PN-EN 16729-3 [3]. Rys. 4 przedstawia zobrazowanie rozkładu ciśnienia akustycznego głowicy 2T70-A15x15 oraz wykresy zależności poziomu echa wady modelowej  $\varnothing=8\text{mm}$  od jej odległości od głowicy. Wykres w prawym oknie potwierdza, że wyżej opisana głowica nie jest w stanie zarejestrować echa od wady modelowej na poziomie wystarczającym do zobrazowania na defektoskopie powyżej poziomu szumów dla położenia wady odsuniętych od osi szyny o  $Z_w=13\text{mm}$  oraz  $Z_w=5\text{mm}$ . Amplituda echa od reflektora modelowego ustawionego dokładnie w osi szyny ( $Z_w=0$ ) osiąga maksimum,  $-10\text{dB}$  względem idealnego reflektora DSR=3mm, w odległości 30mm od środka głowicy. Jest to poziom echa wady dający pewne szanse na jej wykrycie jednak daleki od optymalnego. Przesunięcie reflektora modelowego w bok o 13mm ( $Z_w=13$ ) powoduje, że maksymalny poziom echa wady spada poniżej  $-40\text{dB}$ , co w praktyce oznacza całkowity brak możliwości detekcji.

W trakcie symulacji komputerowych przy wykorzystaniu programu SymUT przetestowano różne konfiguracje parametrów głowic i określono optymalne parametry konstrukcyjne (częstotliwość, kąt załamania, kąt zбочenia, rozmiary przetwornika, a także położenie i orientację głowicy na główce szyny) dla głowic do wykrywania pęknięć poprzecznych prostopadłych do powierzchni badania. Na tej podstawie opracowano projekt głowicy ultradźwiękowej, oznaczonej symbolem 2L80-A16x8, zoptymalizowanej do wykrywania pęknięć poprzecznych główki szyny (pęknięć zmęczeniowych) oznaczonych w katalogu wad UIC 712 R kodami 111 i 211.



**Rys. 4.** Rozkład ciśnienia akustycznego i wykres poziomu echa wady modelowej

w funkcji odległości do wady dla głowicy 2T70-A15x15.

**Fig. 4.** Sound pressure distribution and echo level plot of the model defect as a function of distance to the defect for the 2T70-A15x15 probe.

Wyniki symulacji dla tej głowicy, przesuwanej wzdłuż szyny w odległości  $Z_g=8\text{mm}$  od osi szyny i skierowanej pod kątem 10 od tej osi przedstawiono na rys. 5. Dla wady modelowej  $\varnothing=8\text{mm}$ , znajdującej się w górnym narożu główki szyny w odległości  $Z_w=24\text{mm}$  od jej osi, wyliczona wartość maksymalnej amplitudy echa jest tylko o 3dB niższa od referencyjnego poziomu reflektora DSR 3mm. Wynik ten wskazuje na duże prawdopodobieństwo wykrycia wady przez zaprojektowaną głowicę w odległości 50-70 mm od jej środka. Należy zauważyć, iż właściwie dobrana rozbieżność wiązki w płaszczyźnie pionowej i poziomej, częściowo niweluje straty amplitudy echa, wynikające z nieoptymalnej orientacji powierzchni wady względem kierunku fali padającej. W rezultacie zapewniona zostaje możliwość detekcji trudnej do wykrycia wady pod warunkiem przeprowadzenia

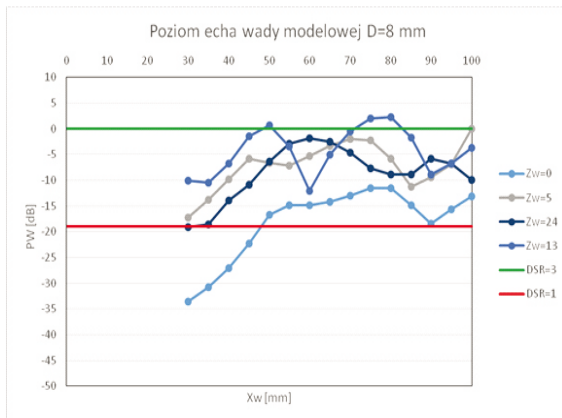
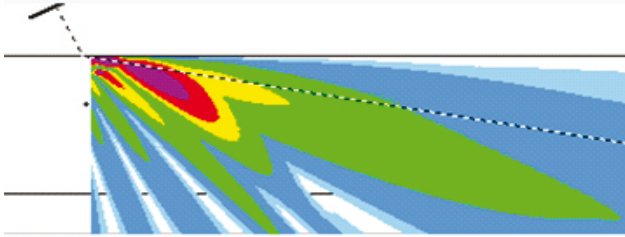


starannego procesu kalibracji na próbkach wzorcowych.

Symulacji poddana została również wada modelowa umiejscowiona w odległości 13mm ( $Z_w=13\text{mm}$ ) od osi szyny odpowiadająca nieco bardziej rozwiniętej wadzie typu zmęczeniowego pęknięcia poprzecznego. Widoczna na wykresie krzywa poziomu echa sygnału w dwóch miejscach przewyższa poziom amplitudy reflektora  $DSR=3$ . Wystąpienie dwóch maksimum na wykresie wiąże się z rozkładem pola akustycznego głowicy (pokazanego na rys. 5 po lewej stronie), w którym występują silne listki boczne wiązki. Wyniki symulacji pokazane na wykresie potwierdzają dobry poziom amplitudy echa od wad modelujących zmęczeniowe pęknięcia położone w bocznych strefach głowicy.

Projekt głowicy o symbolu 2L80-A16x8 zoptymalizowanej do wykrywania wyżej opisanych wad zakłada wykonanie głowicy kątowej fal podłużnych o kącie załamania  $\beta=80^\circ$ , częstotliwości  $f=2\text{ MHz}$  i prostokątnym kształcie przetwornika (16x8mm).

W trakcie modelowania zauważono, że wiele analizowanych typów głowic, o dużych wartościach kąta załamania  $\beta$ , wykazuje znaczną rozbieżność między nominalnym kątem załamania  $\beta$  odpowiadającym osi geometrycznej wiązki, a efektywnym kątem  $\beta$  odpowiadającym osi akustycznej pola ultradźwiękowego. Rozkłady pola akustycznego głowic



Rys. 5. Rozkład ciśnienia akustycznego i wykres poziomu echa wady w funkcji odległości do wady dla głowicy 2L80-16x8.

Fig. 5. Sound pressure distribution and echo level plot of the model defect as a function of distance to the defect for the 2L80-16x8 probe.

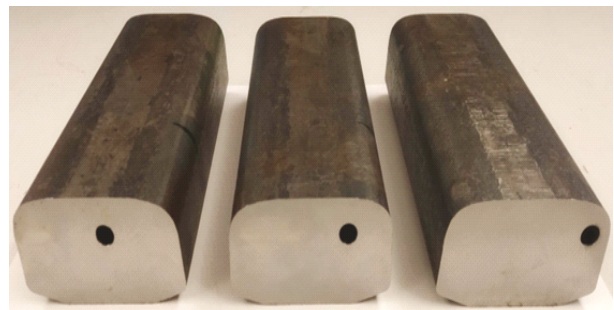
pokazane na rys. 4 i 5 obrazują ten efekt, który należy uwzględnić przy projektowaniu głowic ultradźwiękowych na kąty załamania w zakresie 70 - 80.

W oparciu o opisany wyżej projekt zostanie wykonany

prototyp głowicy ultradźwiękowej 2L80-A16x8. Prototyp ten zostanie przetestowany na specjalnie przygotowanych próbkach odniesienia z otworami płaskodennymi odpowiadającymi rozmiarom, położeniom i orientacji wad modelowych. W każdej próbce została wykonana wada sztuczna w postaci poziomego otworu płaskodennego o średnicy  $\varnothing=8\text{mm}$  i głębokości 50mm. W różnych próbkach otwory zostały wykonane w różnych odległościach, odpowiednio 5, 13 i 24 mm, od środka głowki szyny, tak aby można było sprawdzić czułość wykonanego prototypu głowicy na wady zlokalizowane w różnych obszarach głowki szyny i porównać ją z wynikami symulacji.

#### 4. Model wady kontaktowo-zmęczeniowej – Head Checking (2223)

Kolejną typową wadą występującą na polskich szlakach kolejowych jest wada nr 2223 opisana w katalogu wad szyn jako pęknięcie na wewnętrznej krawędzi głowki szyny, czyli



Rys. 6. Próbkę odniesienia do sprawdzenia wykrywalności wad typu 211.

Fig 6. Reference samples for checking the detectability of 211 type defects.

tw. Head Checking (H-C). Jest to jedna z najbardziej niebezpiecznych wad głowki szyny, mogąca prowadzić do całkowitego pęknięcia lub odpadnięcia znacznej części powierzchni tocznej szyny. Powstaje ona w wyniku zmęczenia materiału na skutek kontaktu koło-szyna.

Na rys. 7 przedstawiono wady H-C występujące w różnych odcinkach eksploatowanego toru. Obraz wady widoczny w lewym oknie jako seria powtarzających się pęknięć o małej szczelinie jest charakterystyczny dla łuków torów o promieniu 400-1500m [4]. Ten typ wad H-C powstaje w wyniku ruchu pociągów po łuku. Powstaje wtedy tzw. styk dwupunktowy dla koła nabiegającego.

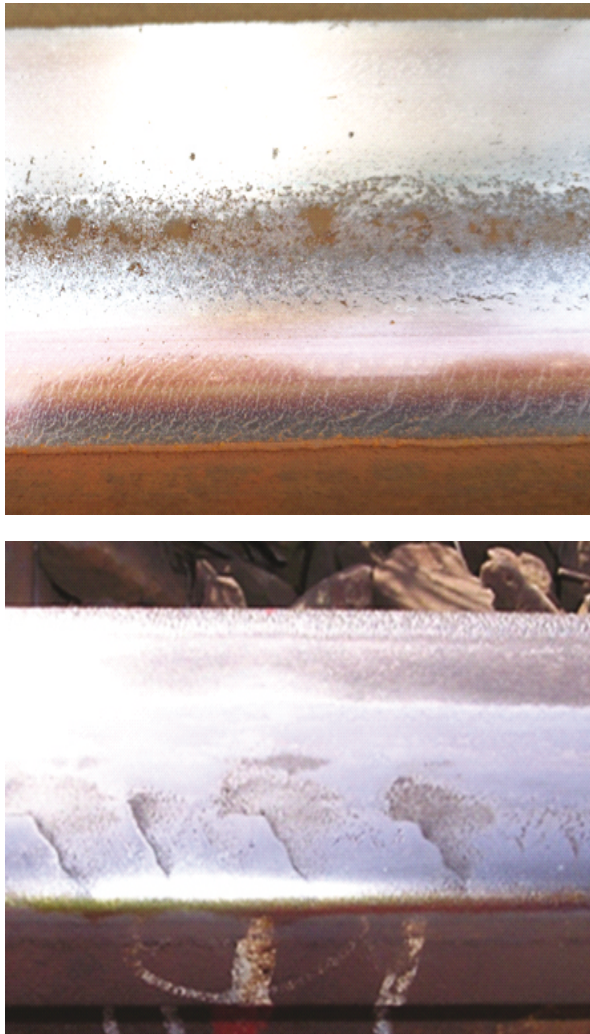
Efekt dużej ilości małych pęknięć wiąże się z dodatkowymi obciążeniami poprzecznymi powstającymi na skutek kontaktu obrzeża koła z wewnętrzną krawędzią szyny, który powoduje szlifowanie bocznej krawędzi głowki. Niestety proces szlifowania krawędzi głowki na skutek eksploatacji toru jest często znacznie wolniejszy niż szybkość propagacji pęknięć. Wyklucza to możliwość samoistnej naprawy głowki poprzez całkowite zeszlifowanie pęknięć na skutek przejazdu pociągów.

Obraz wizualny wady H-C na głowce szyny w łuku znacząco różni się od pęknięć tego samego typu zlokalizowanych na prostym odcinku toru (prawe okno rys. 7). Różnica wynika



z faktu, że na prostych odcinkach toru, w trakcie kontaktu szyna-koło jest przeważnie styk jednopunktowy, gdzie występuje kontakt główki szyny z płaszczyzną toczną koła. Na prostych odcinkach toru nie ma efektu szlifowania główki szyny, a pęknięcia widoczne na powierzchni posiadają większe rozwarście szczeliny i występują w większych odległościach od siebie.

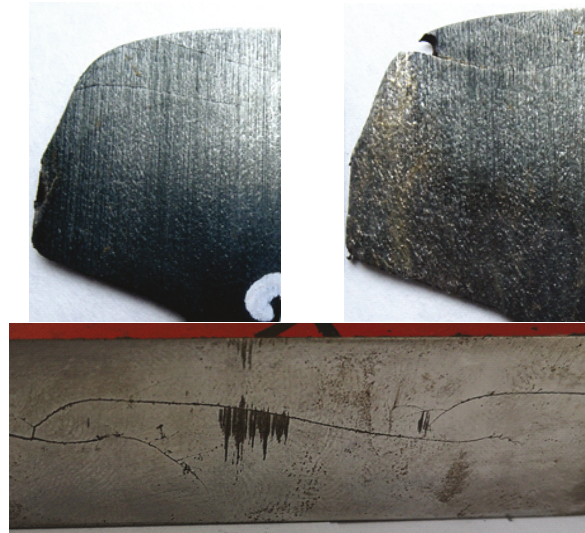
Przykładowy przebieg propagacji pęknięcia H-C w dwóch płaszczyznach przekroju (tj. wzdłuż i w poprzek główki szyny) przedstawiony na rys. 8 daje wyobrażenie o tym jak propaguje pęknięcie H-C wewnątrz materiału. Widać, że kąt propagacji pęknięcia znacząco zmienia się wraz z jego rozwojem.



**Rys. 7.** Zobrazowanie wady nr 2223 - Head Checking. W górnym oknie obraz pęknięć na łuku toru, dolne okno widoczne pęknięcia na odcinku prostym.

**Fig. 7.** Visualization of defect No. 2223 - Head Checking. Upper window shows image of cracks on track curve, lower window shows cracks on straight section.

Bezpośrednio przy krawędzi główki pęknięcie dąży ku dołowi, jednak wraz ze wzrostem głębokości zaczyna propagować się prawie równoległe do powierzchni tocznej szyny. Prace badawczo-rozwojowe nad wadami typu Head Checking zostały podzielone na dwa etapy. Pierwszy etap dotyczy wad



**Rys. 7.** Zobrazowanie wady nr 2223 - Head Checking. W górnym oknie obraz pęknięć na łuku toru, dolne okno widoczne pęknięcia na odcinku prostym.

**Fig. 7.** Visualization of defect No. 2223 - Head Checking. Upper window shows image of cracks on track curve, lower window shows cracks on straight section.

w początkowym stadium rozwoju, kiedy głębokość pęknięcia w główce szyny nie przekracza 3-4 mm. Na podstawie danych o położeniu wady na powierzchni główki, orientacji oraz długości opracowano i wykonano próbki odniesienia z nacięciami bocznej powierzchni główki o głębokości 2 oraz 4mm (rys. 9). Nacięcia wykonano tarczą R50 przy kącie natarcia w płaszczyźnie poziomej równym  $35^\circ$  i w płaszczyźnie pionowej prostopadłej do linii wady  $\Theta=63^\circ$  (licząc od pionowego ustawienia tarczy). Próbki te mają za zadanie reprezentować wady H-C w początkowym stadium rozwoju i będą służyć do testowania i weryfikacji głowicy zaprojektowanej do wykrywania tego rodzaju wad.

Pierwsze doświadczenia przeprowadzone na w/w próbkach potwierdziły możliwość skutecznego wykrywania wad H-C głowicą o symbolu 2R-A7x7 (rys. 10). Jest to głowica fal powierzchniowych o częstotliwości  $f = 2$  MHz z przetwornikiem kwadratowym o długości boku 7 mm. Stosunkowo niska częstotliwość głowicy oznacza, że długość wytwarzanej przez nią fali powierzchniowej wynosi  $\lambda R=1,5$  mm. Taka, stosunkowo duża długość fali redukuje możliwość powstawania fałszywych wskazań od drobnych uszkodzeń (zarysowań, wżerów korozyjnych) powierzchni tocznej szyn, zapewniając jednocześnie możliwość wykrywania pęknięć o głębokości powyżej 1,5 mm. Dodatkowo, na korzyść wyboru przetwornika o niższej częstotliwości, przemawia fakt, że posiada on krótsze pole bliskie oraz większą rozbieżność wiązki. Oba te czynniki istotnie wpływają na wykrywalność wad typu H-C przez głowicę. Większa szerokość oraz rozbieżność wiązki w strefie występowania wad H-C (na wewnętrznej krawędzi główki) podwyższa prawdopodobieństwo ich wykrycia niezależnie od naturalnego zróżnicowania w ich orientacji i położeniu. Niezależnie od pozytywnych wyników testów przeprowadzonych na próbkach z wadami sztucznymi, w

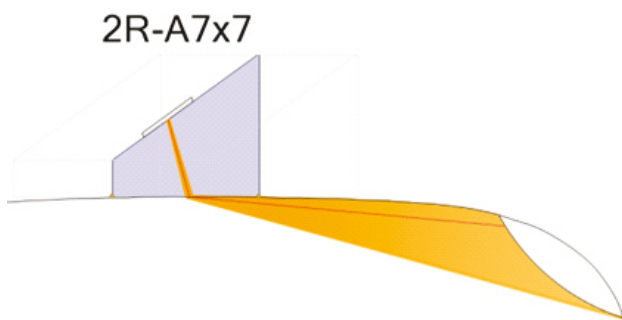
dalszym etapie prac, planowane jest sprawdzenie w/w głowic na rzeczywistych wadach H-C występujących w eksploatowanych torach.

Drugi etap prac nad wadami typu H-C będzie dotyczył wykrywania ich rozwiniętej postaci w głowce szyny. Na etapie pisania artykułu stworzone zostały wady modelowe oraz próbki odniesienia z wadami sztucznymi reprezentującymi rozwinięte postacie wady H-C występujące w torze. Próbki



**Rys. 7.** Zobrazowanie wady nr 2223 - Head Checking. W górnym oknie obraz pęknięć na łuku toru, dolne okno widoczne pęknięcia na odcinku prostym.

**Fig. 7.** Visualization of defect No. 2223 - Head Checking. Upper window shows image of cracks on track curve, lower window shows cracks on straight section.



**Rys. 10.** Schemat ustawienia głowicy fal powierzchniowych względem wady Head Checking.

**Fig. 10.** Scheme for positioning the surface wave probe against the Head Checking defect.

te posłużą do doświadczalnej weryfikacji odpowiedniej głowicy ultradźwiękowej zaprojektowanej w oparciu o symulacje komputerowe.

Pod pojęciem rozwiniętej postaci wady H-C będziemy rozumieć pęknięcia, które znajdują się w materiale głowki szyny na głębokości, co najmniej, 10 mm od powierzchni. Dodatkową cechą rozwiniętej wady H-C jest wyraźna zmianą kąta propagacji wady w głąb materiału wraz z rozwojem pęknięcia. Dla rozwiniętych postaci wad H-C kąt ten dąży do wartości 1-2° względem płaszczyzny poziomej (rys. 8) co oznacza, że pęknięcie propaguje się w materiale niemal równoległe do płaszczyzny tocznej głowki. W sytuacji połączenia się kolejno następujących po sobie pęknięć H-C (rys. 7) może dojść do całkowitego odspojenia materiału głowki na powierzchni tocznej szyny (łuszczenie się lub wykruszenia na bocznej krawędzi szyny) [4]. Innym niebezpiecznym skutkiem rozwoju wad typu H-C może być inicjacja pionowego pęknięcia poprzecznego (rys. 2), które doprowadzi do jej ostatecznego złamania. Rys. 11 przedstawia w lewym oknie charakterystyczne wykruszenie krawędzi szyny, którego przyczyną jest połączenie się kolejnych pęknięć H-C. Natomiast zdjęcie z prawej strony rys. 11 [5] obrazuje jeden z najniebezpieczniejszych przypadków uszkodzenia toru poprzez złamanie szyny w wyniku rozrostu poprzecznego pęknięcia zmęczeniowego zainicjowanego od rozwiniętej wady typu H-C.

Dotychczasowe prace nad projektem głowicy skutecznie wykrywającej wady typu H-C w stadium zaawansowanym wskazują na konieczność wykorzystania dolnej powierzchni głowki szyny do odbicia fali ultradźwiękowej. Wykorzystanie odbicia



**Rys. 11.** Zobrazowanie wykruszenia krawędzi głowki (lewy obraz) oraz całkowitego pęknięcia poprzecznego (prawy obraz) zainicjowanego od wady typu Head Check.

**Fig. 11.** Visualization of head edge chipping (left image) and a complete transverse crack (right image) initiated from a Head Checking defect.

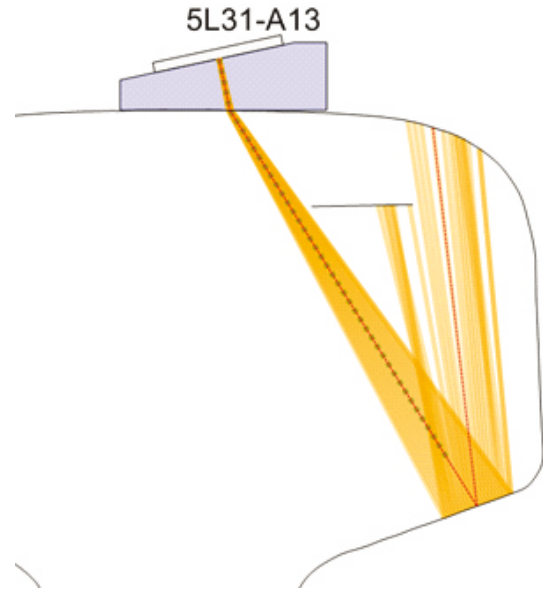


fali od powierzchni przeciwległej, czyli swego rodzaju echa dna, daje możliwość wykrywania rozwiniętych wad typu H-C niezależnie od ich dokładnej orientacji czy głębokości zalegania pod powierzchnią toczną główki szyny. Badanie takie może bazować nie tylko na detekcji echa odbitego bezpośrednio od powierzchni wady (którego wysokość silnie zależy od orientacji wady i które może znajdować się w strefie martwej głowicy) lecz także na obserwacji wysokości echa dna odbitego od dolnej powierzchni główki. Wielkość spadku amplitudy echa dna (wskutek przesłonięcia wiązki przez wadę) można powiązać z głębokością penetracji wady H-C w kierunku środka szyny. Informacją uzyskiwaną z takiego badania będzie więc, nie tylko wykrycie obecności wady lecz także przybliżona ocena stopnia jej rozwoju. Obserwując ewentualne dodatkowe echa pochodzące bezpośrednio od powierzchni wady można będzie określić głębokość jej zalegania pod powierzchnią toczną główki.

Wstępne wyniki symulacji wskazują na możliwość zastosowania głowicy kątowej fal podłużnych o częstotliwości  $f = 4 - 5$  MHz i średnicy przetwornika 10 - 13mm. Kąt załamania tych głowic powinien być dopasowany do kąta odchylenia dolnej powierzchni główki od płaszczyzny poziomej, czyli powinien wynosić ok.  $20^\circ$ .

Założeniem kompleksowej techniki wykrywania i oceny wad typu H-C zarówno w stadium początkowym jak rozwiniętym jest możliwość wiarygodnej detekcji oraz oceny stopnia rozwoju tych wad w materiale szyny. Zobrazowania na rys. 12 przedstawiają dodatkowe schematy ustawień głowic ultradźwiękowych, które mogą być wykorzystane do wykrywania i oceny rozwiniętych wad typu H-C.

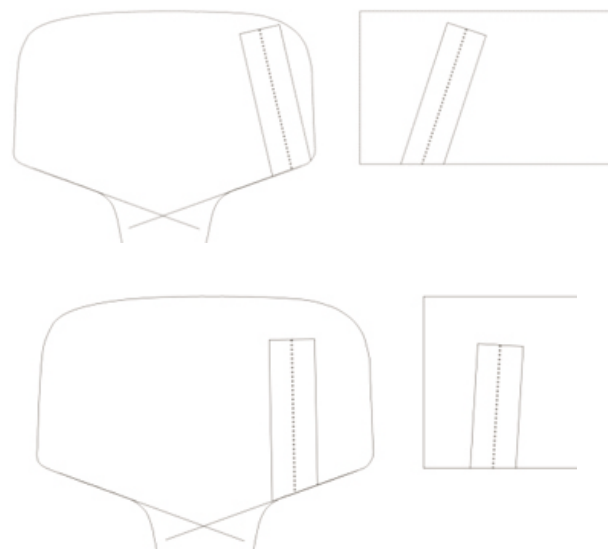
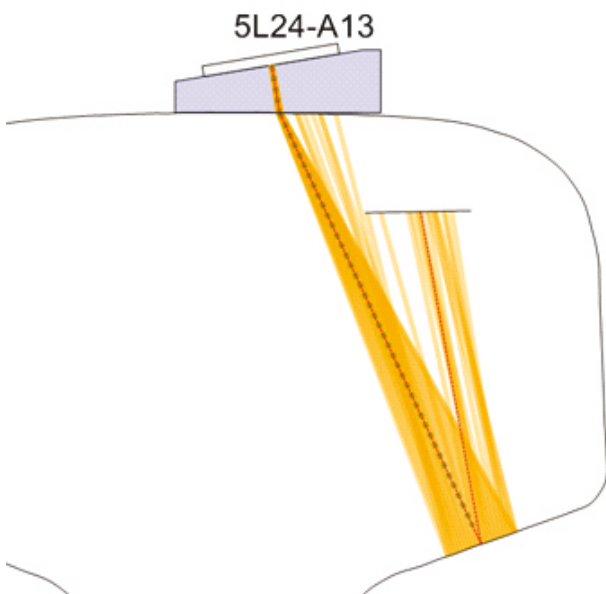
W celu doświadczalnego sprawdzenia skuteczności głowic zaprojektowanych do wykrywania rozwiniętych wad typu H-C zostały przygotowane specjalne próbki szyn z wadami sztucznymi reprezentującymi średniozaawansowaną i zaawansowaną postać wady



Rys. 12. Zobrazowania możliwych technik badania z wykorzystaniem odbicia fali ultradźwiękowej od dolnej powierzchni główki szyny.

Fig. 12. Visualize of a possible examination techniques using the reflection of the ultrasound wave from the lower surface of the rail head.

H-C. Stadium średniozaawansowane (górny obraz rys. 13) charakteryzuje się większymi kątami reflektora względem płaszczyzny poziomej oraz mniejszą głębokością (ok. 3mm) pod powierzchnią toczną szyny. Stadium zaawansowane (dolny obraz rys. 13) charakteryzuje się prawie równoległą orientacją reflektora w stosunku do płaszczyzny tocznej szyny oraz głębokością zalegania wady wynoszącą ok. 9 mm.



Rys. 13. Próbkki odniesienia z wadami sztucznymi do testowania głowic ultradźwiękowych projektowanych do wykrywania rozwiniętych wad typu H-C.  
Fig. 13. Reference samples with artificial defects for testing ultrasonic heads designed to detect developed H-C defects.



## 5. Podsumowanie

- Zastosowanie modelowania komputerowego do projektowania głowic i symulacji badań ultradźwiękowych okazało się przydatne przy opracowywaniu metod detekcji i oceny wad kontaktowo-zmęczeniowych charakterystycznych dla kolei wysokich prędkości. Bardzo istotna w tym kontekście jest również znajomość typów, lokalizacji oraz sposobów rozwijania się wad w szynie kolejowej.
- Ze względu na złożony kształt przekroju poprzecznego, nierównoległe powierzchnie oraz wiele krzywizn szyna kolejowa stanowi obiekt 3D trudny do matematycznego opisu i modelowania propagacji wiązki ultradźwiękowej. Dodatkowo, wiele krytycznych wad szyn kolejowych (np. Head Checking) rozpoczyna się w trudno dostępnych dla badań ultradźwiękowych miejscach szyny (np. przy górnej krawędzi głowki). Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej przez fakt, że diagnostyczne badania szyn należy prowadzić w sposób szybki i zautomatyzowany, bez możliwości indywidualnego analizowania i wymiarowania poszczególnych wskazań. W sytuacji obserwowanego wzrostu występowania groźnych i trudnych do wykrycia wad kontaktowo-zmęczeniowych i pęknięć poprzecznych problem ten nabiera wyjątkowo dużego znaczenia dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego.
- Dotychczas stosowane techniki defektoskopowe nie są wystarczająco skuteczne zarówno jeśli chodzi o wykrywanie, jak też ocenę głębokości i rozległości tego typu wad. W dotychczasowej praktyce, ocenę wad typu Head Checking przeprowadza się jedynie metodą wizualną w oparciu o widoczny na zewnątrz zarys pęknięcia. Nie daje to dostatecznej pewności co do rzeczywistego rozmiaru wady wewnątrz szyny. W wyniku dotychczasowych prac mających na celu znalezienie optymalnej konfiguracji przetworników do badań ultradźwiękowych szyn zostały opracowane głowice do wykrywania pęknięć poprzecznych pionowych oraz pęknięć typu Head Checking w

początkowej fazie ich rozwoju w bocznej części głowki szyny kolejowej. Efektem końcowym tych prac będzie opracowanie optymalnej konfiguracji przetworników ultradźwiękowych dla jednotokowych stanowisk pomiarowych ręcznych oraz wagonu defektoskopowego umożliwiających wykrywanie i klasyfikowanie większej liczby wad szyn niż możliwe było to do tej pory. Doprowadzi to do zwiększenia bezpieczeństwa ruchu pojazdów szynowych na polskich liniach kolejowych.

Praca powstaje w wyniku realizacji projektu badawczego o nr POIR.04.01.01.-00-0011/17 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Wspólnego Przedsięwzięcia BRIK.

## 6. Literatura

- [1] B. Ładecki, M. Nagieć, A. Burda, R. Janur i in.: Ocena stanu technicznego torowiska mostów przeładunkowych. PREH – praca nie publikowana, Kraków 2017.
- [2] PN-M-45495:1995: Dźwignice. Tory jezdne suwnic półbramowych i bramowych. Wymagania.
- [3] PN-EN 1090:2018 – Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
- [4] K. Juzwa: Wytyczne wykonania pomiarów geodezyjnych jezdni suwnicowych i suwnic. Ministerstwo Przemysłu Ciężkiego, Warszawa, 1973.
- [5] N. Dowling: Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Printice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1999.
- [6] K. Rykulak: Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
- [7] E. Masłowski, D. Spiżewska: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych. Arkady, Warszawa 1988.
- [8] J. Ziółko: Utrzymanie i modernizacja konstrukcji stalowych. Arkady, Warszawa 1991.
- [9] J. Ziółko, W. Włodarczyk, Z. Mendera, S. Włodarczyk: Konstrukcje stalowe specjalne. Arkady, Warszawa, 1995.