

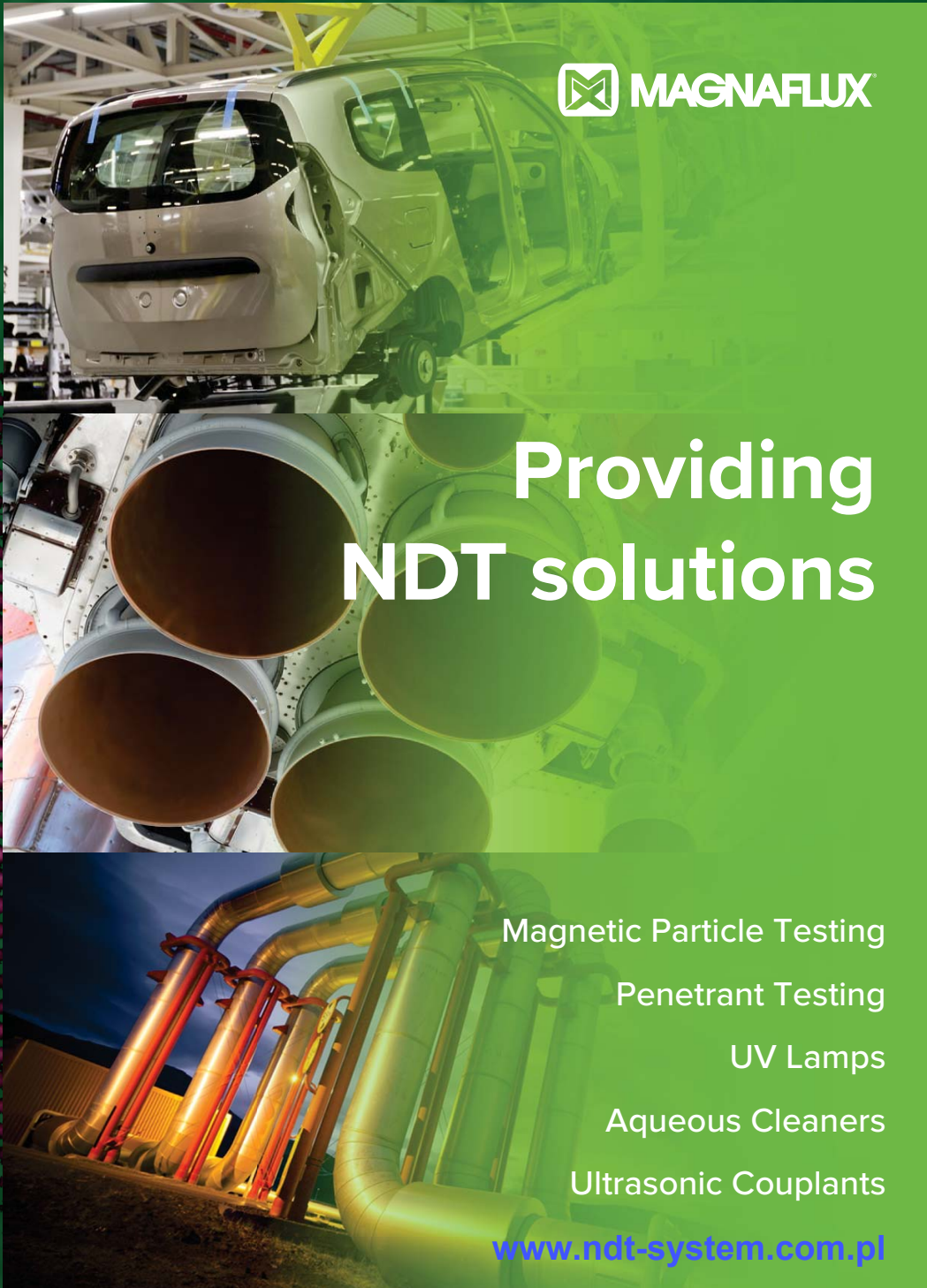
# Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


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 najostrzejsze 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 kontaktowozmęczenia 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 stopki 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 płk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM** ..... 124

Informacje dla Autorów i Czytelników ..... 125

\* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA  
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Maciej Szwed\*, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński

Urząd Dozoru Technicznego, ul. Szczęśliwicka 34, 02-353 Warszawa

# Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array

## Hydrogen blisters detection by TOFD, TULA and Phased Array ultrasonic methods

### STRESZCZENIE

Badaniom poddano wycinek płaszcza aparatu instalacji rafinerijnej pracującego w środowisku zawierającym wodór, w którym na powierzchni wewnętrznej, podczas rutynowych oględzin, odnotowano obecność pęcherzy wodorowych. Przeprowadzone badania ultradźwiękowe wykazały występowanie wskazań pochodzących od nieciągłości materiałowych o różnej wielkości i różnie umiejscowionych w badanej próbce. Zastosowane w niniejszej pracy techniki badań, dzięki możliwości wykorzystania różnych form obrazowania graficznego i większej rozdzielczości, pozwoliły na znacznie łatwiejszą interpretację wyników niż miałyby to miejsce w przypadku zastosowania klasycznych badań ultradźwiękowych, z głowicą o pojedynczym przetworniku, opartych na analizie poszczególnych impulsów (zobrazowań typu A). Analizując różne typy zobrazowań, w oparciu o informacje dotyczące warunków eksploatacji oraz możliwych do wystąpienia mechanizmów degradacji, określono rodzaj i pochodzenie nieciągłości. Podjęto również próbę określenia na podstawie widocznych wskazań na jakim etapie powstawania są pęcherze wodorowe.

**Słowa kluczowe:** degradacja wodorowa, pęcherze wodorowe, badania ultradźwiękowe

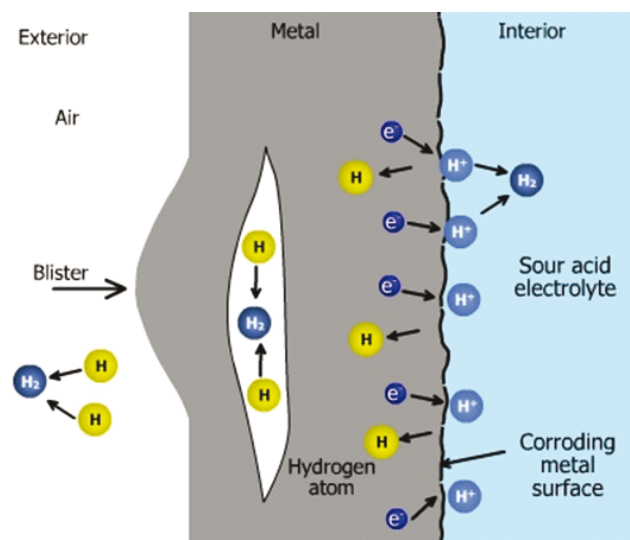
### ABSTRACT

A section of the shell of the unit of a refining plant operating in a hydrogen-containing environment was examined, where the presence of hydrogen blisters was noted on the inner surface during routine visual inspection. The ultrasonic tests carried out revealed indications coming from material discontinuities of various sizes and different locations in the test sample. The testing techniques used in this study, due to the possibility of using various forms of graphic imaging and higher resolution, allowed for a much easier interpretation of the results than would be possible if classical ultrasonic tests, with a single transducer head, based on the analysis of individual pulses (A-scan) were used. Analyzing different types of imaging, based on information on operating conditions and possible degradation mechanisms, the character and origin of discontinuities were determined. An attempt was also made to determine, based on the visible indications, at what stage of formation the hydrogen blisters are.

**Keywords:** hydrogen degradation, hydrogen blisters, ultrasonic testing

### 1. Wstęp

Blistering jest formą niszczenia wodorowego głównie stali węglowych i niskostopowych pracujących w środowisku wilgotnego siarkowodoru. Występuje najczęściej na wewnętrznej powierzchni zbiorników ciśnieniowych. Tworzenie pęcherzy wodorowych powodowane jest przez atomy wodoru, które powstają na powierzchni stali w wyniku zachodzących reakcji korozyjnych. Siarka, obecna w medium, stanowi promotor wnikania wodoru do materiału, spowalniając reakcję rekombinacji wodoru z postaci atomowej do cząsteczkowej, pozwalając tym samym na dłuższą jego obecność na powierzchni materiału [1]. W wyniku zachodzących procesów atomy wodoru mogą łatwo dyfundować do sieci krystalicznej materiału i gromadzić się w miejscach nieciągłości materiałowych takich jak wtrącenia niemetaliczne, pory czy rozwarstwienia, gdzie następnie łączą się w cząsteczki. Molekuły wodoru są zbyt duże, żeby dalej dyfundować przez sieć krystaliczną, zostają zatem



Rys. 1. Mechanizm powstawania pęcherzy wodorowych [3].

Fig. 1. Mechanism of hydrogen blister formation [3]

\*Autor korespondencyjny.

E-mail: Maciej.Szwed@udt.gov.pl



uwięzione w pułapce. Z czasem zachodzenia procesów korozyjnych na powierzchni i dyfuzji wodoru w głąb stali wzrasta ilość spulapkowanego wodoru, a tym samym jego ciśnienie w pułapce, i w konsekwencji dochodzi do powstania lokalnego odkształcenia materiału w postaci pęcherza (blistra) [2].

## 2. Techniki ultradźwiękowe wykorzystywane m.in. w detekcji degradacji wodorowej

Dokumenty opisujące mechanizmy degradacji materiałów w przemyśle rafineryjnym [2] wskazują również metody badań nieniszczących umożliwiających ich detekcję. W przypadku możliwości wystąpienia zjawisk związanych z niskotemperaturowymi odmianami degradacji wodorowej, niekiedy wystarczające mogą być badania wizualne. Jednak, przykładowo, w początkowym stadium powstawania pęcherzy wypełnionych wodorem, nieciągłości pozostają w objętości materiału i nie są widoczne na powierzchni, dlatego ich wykrycie powierzchniowymi metodami jest niemożliwe, i należy tutaj wykorzystać objętościowe metody badań nieniszczących, tj. badania ultradźwiękowe. W przypadku, gdy spodziewanym rodzajem uszkodzenia jest np. pęknięcie indukowane wodorem (HIC), i pęknięcia powstają na powierzchni materiału, odpowiednio będzie zastosowanie powierzchniowych metod badań nieniszczących. Natomiast w przypadku, gdy spodziewanym uszkodzeniem są wysokotemperaturowe odmiany degradacji wodorowej (HTHA) zazwyczaj stosuje się zaawansowane techniki badań ultradźwiękowych (Phased Array, Advanced Ultrasonic Backscatter Technique, pomiar ilorazu prędkości fal ultradźwiękowych, Time of Flight Diffraction, pomiar tłumienia fali ultradźwiękowej) ukierunkowane w stronę detekcji tego rodzaju uszkodzeń.

Najczęściej wykorzystywaną metodą badań ultradźwiękowych jest metoda echa przy zastosowaniu klasycznej głowicy o jednym przetworniku. Jednakże w niniejszej pracy skupiono się na porównaniu wyników uzyskanych nowoczesnymi technikami badań ultradźwiękowych, tj. Phased Array (PA), Time of Flight Diffraction (TOFD) i TOFD-Ultra Low Angle (TULA).

### Technika Phased Array

W technice Phased Array do generowania wiązki fali ultradźwiękowej wykorzystuje się głowice wieloprzetwornikowe, w których każdy z elementów (przetworników) jest generowany i sterowany indywidualnie. Powszechnie stosowane głowice PA posiadają najczęściej od 16 do 128 przetworników, a każdy z nich posiada oddzielne podłączenie i przetwornik analogowo-cyfrowy oraz jest akustycznie odizolowany od pozostałych.

Gdy przetworniki głowicy PA wzbudzane są jednocześnie formowana jest wiązka ultradźwiękowa zbliżona do wiązki pochodzącej z klasycznej głowicy jednoprzetwornikowej. Natomiast, gdy poszczególne przetworniki wzbudzane są z ustalonymi opóźnieniami czasowymi generowana wiązka jest wypadkową wszystkich fal kulistych generowanych przez poszczególne przetworniki.

Formułowanie opóźnień czasowych dla nadajnika

i odbiornika głowic wieloprzetwornikowych umożliwia ogniskowanie wiązki na wybranej głębokości oraz sterowania jej kątem.

Dzięki możliwości generowania wielu wiązek ultradźwiękowych i sterowaniu nimi możemy generować różnego typu zobrazowania, tj. S-scan, B-scan, C-scan oraz ich pochodne. Graficzna prezentacja wyników znacząco ułatwia ich interpretację, co często przekłada się na możliwość określenia rodzaju nieciągłości [4].

### Technika Time of Flight Diffraction

Technika TOFD polega na wprowadzeniu do badanego obiektu szerokiej wiązki fal ultradźwiękowych, mogących wzbudzić fale dyfrakcyjne (rejestrowane podczas badania) powstające na wierzchołkach nieciągłości. Sygnały dyfrakcyjne mają niższą amplitudę niż fale odbite, ale rozchodzą się w szerokim zakresie kątowym.

W badaniu TOFD wykorzystuje się dwie głowice kątowe fal podłużnych (nadawczą i odbiorczą) ustawione naprzeciw siebie po dwóch stronach badanego obszaru, np. spoiny. Z jednej głowicy wysyłane są fale ultradźwiękowe, które docierają do drugiej głowicy po różnych drogach. Część z nich dochodzi jako fala podpowierzchniowa (LW- Lateral Wave), bezpośrednio do głowicy odbiorczej. Ze względu na najkrótszą drogę impuls ten dociera jako pierwszy bez zmiany fazy fali. Część wiązki docierająca do odbiornika dopiero po odbiciu od przeciwległej powierzchni ze zmienioną fazą (BW - BackWall). Sygnały LW i BW stanowią linie odniesienia, między którymi potencjalnie mogą pojawiać się sygnały powstające wskutek oddziaływania fal z ewentualnymi nieciągłościami materiału. [5]

W przypadku gdy fala ultradźwiękowa pada na nieciągłość, ulega odbiciu od jej powierzchni oraz dyfrakcyjnemu ugięciu i rozproszeniu na jej krawędziach. Dyfrakcja powoduje propagację fali rozproszonej we wszystkich kierunkach od krawędzi wady. Należy też zauważyć, że impulsy ulegające dyfrakcji na dolnej krawędzi wady nie zmieniają swojej fazy, natomiast impulsy pochodzące z dyfrakcji na górnej krawędzi zmieniają fazę o 180°.

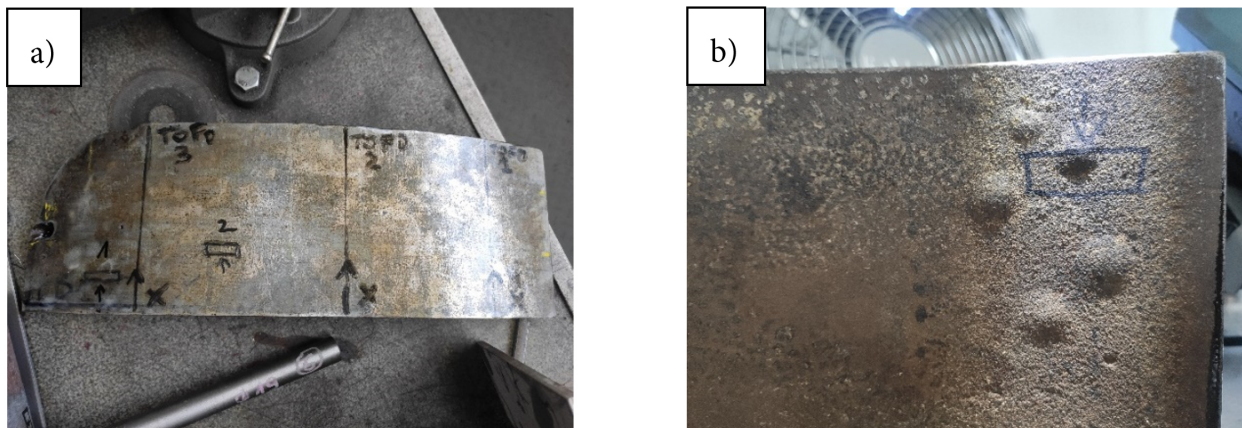
### Technika TULA

W założeniu przeznaczeniem techniki TULA jest wykonywanie badań materiału rodzimego jako badania głowicą prostą fal podłużnych. Nominalna częstotliwość główna to 10 MHz, a szerokość pasma częstotliwości, w ujęciu 6dB spadku, jest charakterystyczna dla techniki TOFD. Szerokie pasmo częstotliwości przekłada się na wąski i krótki impuls, co wiąże się z poprawą rozdzielczości przestrzennej. Należy dodać, iż głowica w tej technice jest głowicą podwójną (nadawczo-odbiorczą), posiadającą 2 kryształy o kacie dachowym, różnym w zależności od typu głowicy. W ten sposób istnieje możliwość penetracji obszaru na różnych głębokościach, z różnym ogniskowaniem wiązki. Ze względu na dobrą rozdzielczość technika TULA dedykowana jest do wykrywania m.in. mechanizmu degradacji HTHA – High Temperature Hydrogen Attack. Jednak głowice można stosować do wykrywania każdego rodzaju nieciągłości [6].

Tab. 1. Skład chemiczny materiału użytego do budowy absorbera.

Tab. 1. Chemical composition of the material used in the construction of the absorber

Pierwiastek	Al	C	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si	Fe
Zawartość (wag.) [%]	≥ 0,02	0,14 – 0,22	≤ 0,30	≤ 0,30	≥ 0,55	≤ 0,30	≤ 0,045	≤ 0,045	0,15 – 0,35	reszta



Rys. 2. Zdjęcia przedstawiające wycinek płaszcza absorbera pobrany do dalszych badań; a – strona zewnętrzna, b – strona wewnętrzna aparatu.

Fig. 2. Photographs showing a section of the absorber shell taken for further study; a - outer side, b - inner side of the apparatus



Rys. 3. Schemat badania wycinka z zaznaczonym układem odniesienia

Fig. 3. Scheme of the sample examination with the reference system marked

### 3. Materiał do badań

Materiałem wykorzystanym w niniejszej pracy był wycinek płaszcza absorbera wodoru instalacji rafineryjnej, w którym prowadzony był proces oczyszczania gazów zasiarczonych. Rewizja wewnętrzna aparatu wykazała obecność pęcherzy wodorowych na powierzchni jednej z blach płaszcza. Ciśnienie robocze medium wynosiło 1,7MPa, natomiast temperatura 60°C. Urządzenie było wykonane ze stali St44K wg PN-H-84024: 1975. Skład chemiczny materiału przedstawiono w Tabeli 1.

Szczegółowym badaniom ultradźwiękowym poddano pobrany wycinek (~420x135x12mm) blachy płaszcza absorbera przedstawiony na Rys. 2. Po wewnętrznej stronie widoczne są pęcherze wodorowe.

### 4. Badania techniką Phased Array

Badanie techniką PA wykonano na zewnętrznej powierzchni wycinka blachy absorbera (X x Y – 420 x 135

mm) wg schematu przedstawionego na rysunku 3. Rozdzielczość skanowania wynosiła X x Y – 1,0 x 0,6 mm. Zastosowano głowicę o 64 elementach o częstotliwości 10 MHz bez zastosowania klina opóźniającego. W celu poprawy rozdzielczości zastosowano ogniskowanie wiązki w drodze na głębokości 11 mm. Bramkę pomiarową ustawiono tak, aby wykrywane było pierwsze pojawiające się w niej echo.

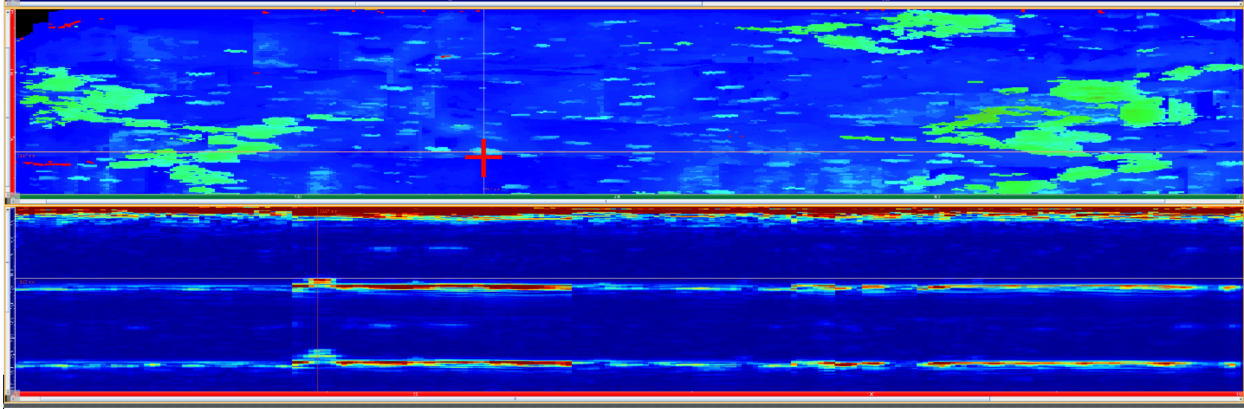
### 5. Wyniki badań PA

Obszar występowania pęcherzy wodorowych (widocznych na rysunku 2) zaznaczono na rysunku 3. Wyniki badań PA ujawniły wskazania pochodzące od rozwarstwień pod pęcherzami widocznymi od strony wewnętrznej. Dodatkowo wykazały istnienie obszarów nieciągłości materiałowych o podobnych rozmiarach, gdzie pęcherze na powierzchni wewnętrznej nie były widoczne. Ich podobny charakter sugerował, że były to rozwarstwienia pod pęcherzami we wczesnym stadium powstawania. Dodatkowo można było



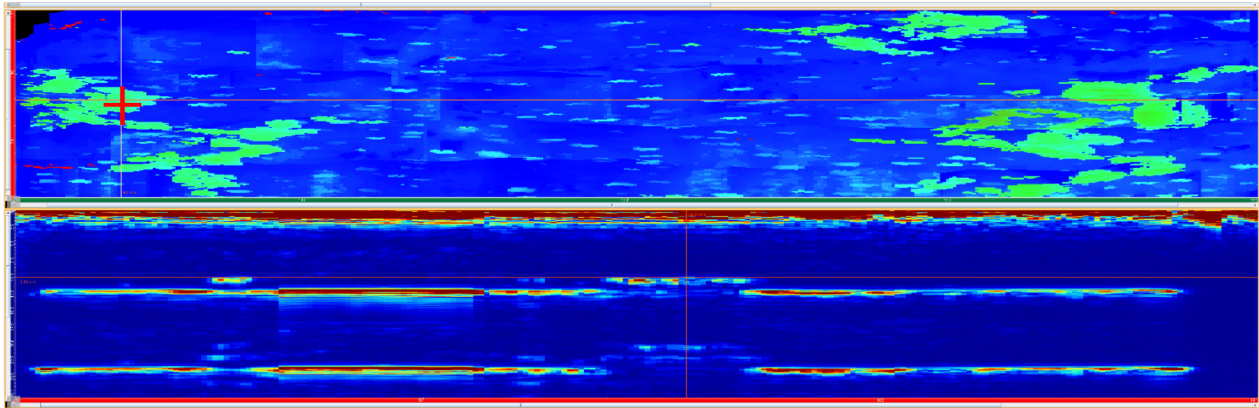
zaobserwować znaczną ilość dużo drobniejszych wskazań pochodzących od wad płaskich o znacznie mniejszych wymiarach, które można interpretować jako wady o charakterze produkcyjnym. Większość nieciągłości układała się równoległe do powierzchni skanowania, przyjmowało

kształt okrągły/owalny, co doskonale oddało zobrazowanie typu C (C-skan). Głębokość zalegania wszystkich nieciągłości wynosiła od ~9 do ~11 mm. Na rysunkach 4 - 6, przedstawiono uzyskane wyniki badań.



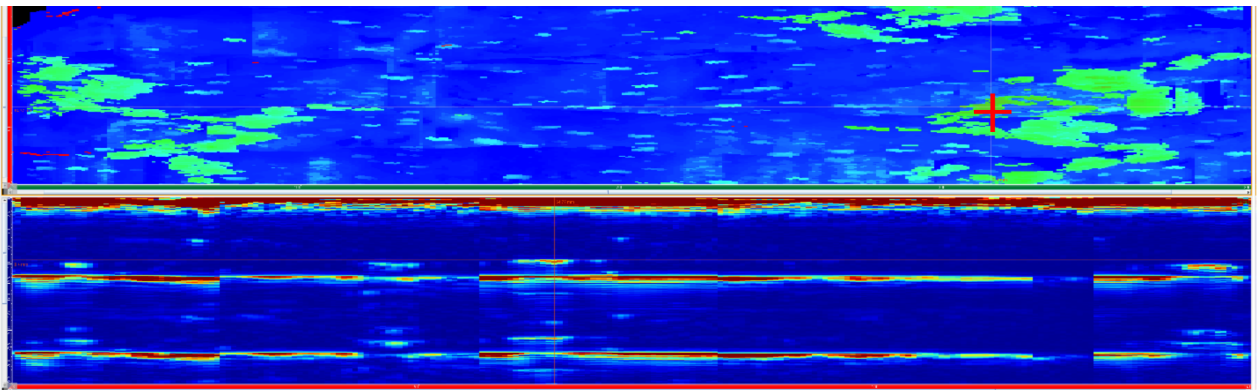
**Rys. 4.** Zobrazowania C-Skan, B-Skan, (w kolejności od góry) oraz widoczne wskazanie (zaznaczone czerwonym krzyżykiem) nakładające się na echo dna. X157;Y40;Z10,8 (mm)

**Fig. 4.** C-Scan, B-Scan, (in order from the top) and visible indication (marked with a red cross) superimposed on the bottom echo. X157;Y40;Z10.8 (mm)



**Rys. 5.** Zobrazowania C-Skan, B-Skan, (w kolejności od góry) oraz widoczne wskazanie (zaznaczone czerwonym krzyżykiem) nakładające się na echo dna. X43; Y73; Z10,1 (mm)

**Fig. 5.** C-Scan, B-Scan, (in order from the top) and visible indication (marked with a red cross) superimposed on the bottom echo. X43; Y73; Z10.1 (mm)



**Rys. 6.** Zobrazowania A-Skan, C-Skan, B-Skan, (w kolejności od góry) oraz widoczne wskazania, na głębokości 9,4 mm (zaznaczone czerwonym krzyżykiem) X314;Y64,7;Z9,4 (mm)

**Fig. 6.** Images of A-Skan, C-Skan, B-Skan, (in order from top) and visible indications, at a depth of 9.4 mm (marked with a red cross) X314;Y64.7;Z9.4 (mm)



## 6. Badania techniką TOFD

Badanie przeprowadzono za pomocą fal podłużnych o częstotliwości 15MHz i kącie padania wiązki 60° w układzie nadajnik-odbiornik. Odległość pomiędzy środkami głowic, zgodnie z wymaganiami normy dla badań TOFD, wynosiła 37,3mm. Rozdzielczość skanowania 0,25mm przy rozdzielczości enkodera 26 kroków/mm.

Znając wyniki badań PA wykonano trzy skany, w obszarze występowania pęcherzy wodorowych (TOFD1), w obszarze nieciągłości o charakterze podobnym do pęcherzy (TOFD3) oraz w obszarze licznych niewielkich wskazań na różnej głębokości (TOFD2). Miejsca wykonanych skanów wskazano na rysunku 7.

## 7. Wyniki badań TOFD

Wybrane wskazania uzyskane podczas badań zestawiono w poniższej tabeli, natomiast na kolejnych rysunkach przedstawiono zapisy poszczególnych skanów. Badania te potwierdziły wyniki uzyskane podczas badań PA. Najwyraźniejsze wskazania uzyskano w miejscu linii TOFD1, czyli w obszarze widocznych pęcherzy wodorowych. Należy zauważyć, że największe ze wskazań, w tym obszarze, powodują miejscami całkowite przesłonięcia linii echa dna (lokalny zanik linii BW). W linii TOFD2 występowało dużo mniejszych i znacznie mniej wyraźnych wskazań, natomiast w linii TOFD3 występowały wskazania pośrednie. W tym przypadku nie jest widocznych zanik echa dna.



**Rys. 7.** Miejsca wykonania skanów TOFD na badanym wycinku; TOFD 3 (95 mm na OY), TOFD 2 (240 mm na OY), TOFD 1 (351 mm na OY). Strzałkami zaznaczono kierunek przejazdu skanera w OX (początek OX – punkt 0 – krawędź wycinka)

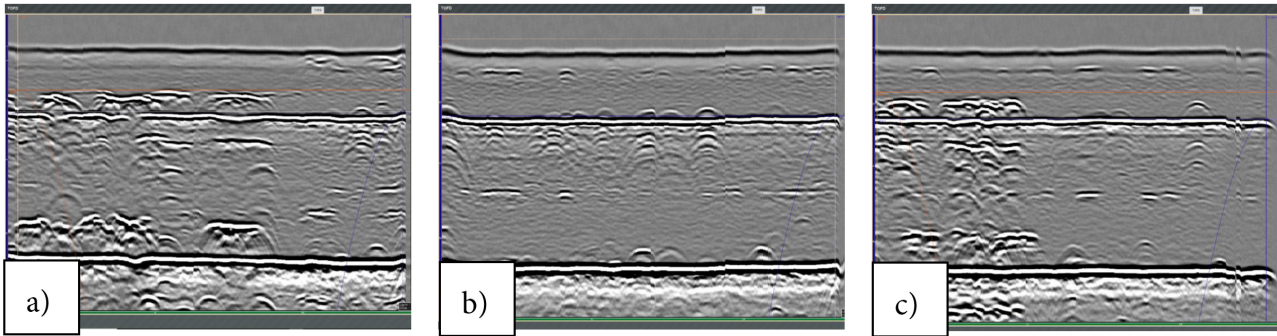
**Fig. 7.** Locations of TOFD scans on the examined slice; TOFD 3 (95 mm on OY), TOFD 2 (240 mm on OY), TOFD 1 (351 mm on OY). The arrows indicate the direction of the scanner's travel in OX (beginning of OX - point 0 - edge of the slice)

**Tab. 2.** Zestawienie wymiarów wybranych wskazań uzyskanych techniką TOFD

**Tab. 2.** Summary of dimensions of selected indications obtained by TOFD technique

Nr wskazania	Oznaczenie skanu	Położenie wskazania [mm]					Typ wskazania
		Początek	Długość	Głębokość		Wysokość	
		x	lx	z <sub>1</sub>	z <sub>2</sub>	h	
1	TOFD1	0	90	9,0	11,7	2,7	B
2	TOFD1	100	33	4,5	6,5	2	C
3	TOFD2	0	5	10	11,7	1,7	B
4	TOFD2	35	56	10,3	11,7	1,4	B
5	TOFD2	6	20	6	7	≤0,9	C
6	TOFD2	90	40	5,7	6,8	≤0,9	C
7	TOFD3	12	7	5,8	6,4	≤0,9	C
8	TOFD3	40	58	5,9	6,5	≤0,9	C
9	TOFD3	0	47	9,4	11,7	2,3	B
10	TOFD3	65	18	10,6	11,7	1,1	B

TYPY WSKAZAŃ: A – wskazanie wychodzące na powierzchnię skanowania, B – wskazanie wychodzące na powierzchnię przeciwną do powierzchni skanowania, C – wskazanie wewnętrzne  
W badanym materiale na wszystkich skanowanych odcinkach występują dodatkowo wskazania punktowe



Rys. 8. Zobrazowania typu B uzyskane w liniach a - TOFD1; b - TOFD2; c - TOFD3

Fig. 8. Type B images obtained in lines a - TOFD1; b - TOFD2; c - TOFD3

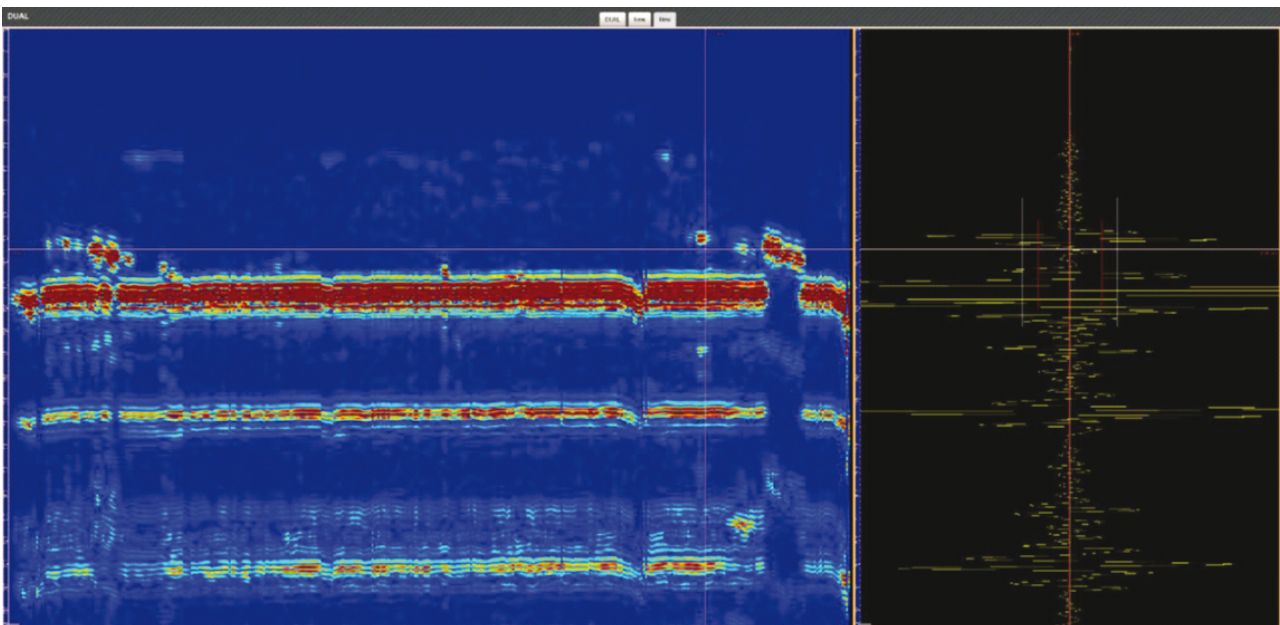
### 8. Badania techniką TOFD Ultra Low Angle (TULA)

Badanie zostało wykonane głowicą podwójną „TULA-B” o kącie wprowadzenia wiązki  $0^\circ - 5^\circ$  i częstotliwości 10 MHz. Kąt pomiędzy przetwornikami, określony przez producenta, został dobrany tak, aby wiązka była ogniskowana na głębokości 10mm. Zastosowano ten sam schemat skanowania oraz ten sam układ współrzędnych co w przypadku techniki PA (patrz Rysunek 3). Bramkę pomiarową ustawiono na detekcję ze szczytu piksu maksymalnej amplitudy echa (max peak), co pozwoliło na określenie głębokości zalegania nieciągłości w danym miejscu.

### 9. Wyniki badań TULA

Podobnie jak w badaniu PA, w tym przypadku również ujawniono szereg ech o dużym zagęszczeniu pochodzących od nieciągłości materiałowych zorientowanych równoległe

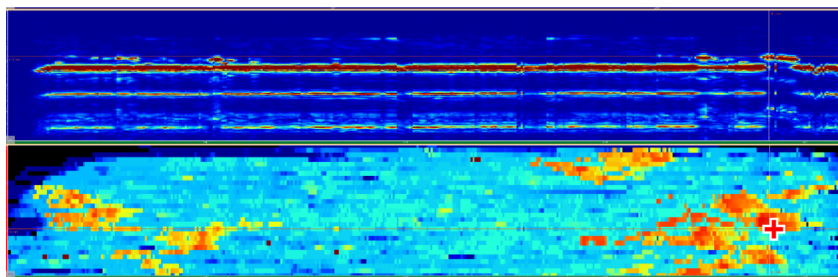
do powierzchni skanowania, co dobrze jest widoczne na zobrażowaniu C-skan. Największe z nich zalegają pod widocznymi pęcherzami oraz z drugiej strony próbki, gdzie nieciągłości mają najprawdopodobniej charakter rozwarstwień (wczesne etapy powstawania pęcherzy). Tak jak w badaniu PA, na różnych głębokościach obserwuje się również echa o mniejszej amplitudzie, pochodzące najprawdopodobniej od nieciągłości materiałowych pochodzących z etapu produkcji blachy. Jednakże w przypadku tych badań należy zauważyć, że dużo łatwiejsze jest odróżnienie stadiów zaawansowania rozwoju pęcherzy wodorowych. W miejscach, gdzie pęcherze są już widoczne niezbrojonym okiem następuje całkowite przesłonięcie echa dna echem pochodzącym od nieciągłości. Natomiast w miejscach, gdzie badania ultradźwiękowe wykazują istnienie rozległych nieciągłości, a pęcherze nie są widoczne, echo dna nie jest całkowicie zasłonięte (patrz rysunki 9 - 12).



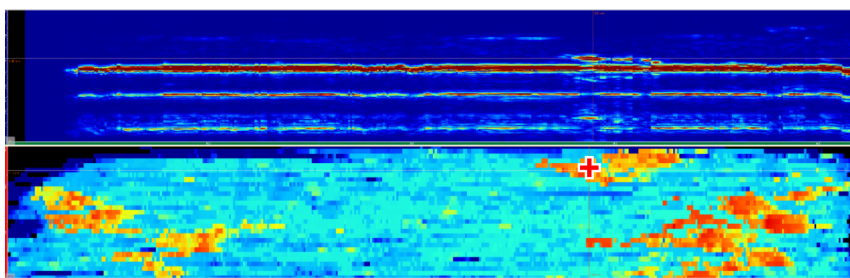
Rys. 9. B-Skan (przekrój w OY) str. lewa. A-Skan – zobrażowanie pojedynczej wiązki str. prawa. (X347;Y65)

Fig. 9. B-Skan (cross-section in OY) left side, A-Skan - single beam imaging right side. (X347;Y65)

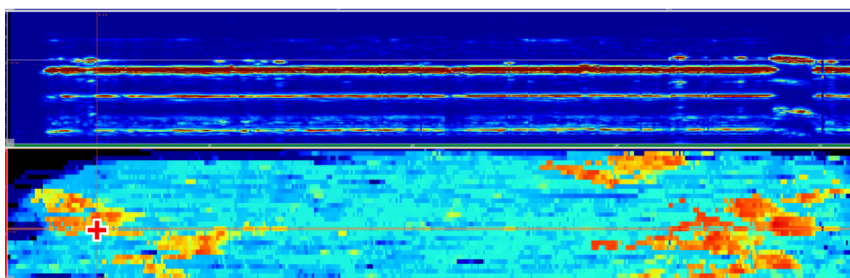




Rys. 10. Zobrazowanie B-skan i C-skan (od góry) – głębokość zalegania wady oznaczonej kursorami 9,2 mm (X381;Y50)  
Fig. 10. B-scan and C-scan imaging (from the top) - depth of the defect marked by the cursors 9.2 mm (X381;Y50)

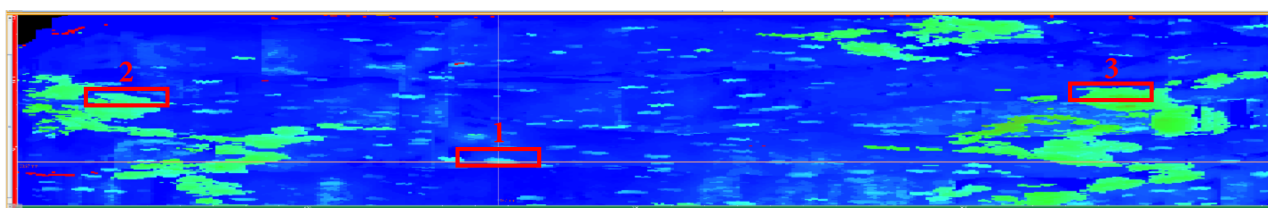


Rys. 11. Zobrazowanie B-skan i C-skan (od góry) głębokość zalegania wady oznaczone kursorami 9,4 mm (X288;Y115)  
Fig. 11. B-scan and C-scan imaging (from top) depth of defect marked with 9.4 mm cursors (X288;Y115)



Rys. 12. Zobrazowanie B-Skan i C-Skan (od góry). Nieciągłość widoczna na obrazowaniu B-Skan, pomiędzy kursorami głębokość zalegania 9,4 mm (X44;Y55)  
Fig. 12. B-Skan and C-Skan imaging (from top). Discontinuity seen on B-Skan imaging, between cursors depth of 9.4 mm (X44;Y55)

Rys. 12. B-Skan and C-Skan imaging (from top). Discontinuity seen on B-Skan imaging, between cursors depth of 9.4 mm (X44;Y55)



Rys. 13. Obszary wybrane do badań mikroskopowych  
Fig. 13. Areas selected for microscopic examination

## 10. Badania mikroskopowe

W celu weryfikacji wyników badań ultradźwiękowych w wytypowanych obszarach pobrano próbki i wykonano badania metalograficzne na ich przekroju. Wytypowane miejsca zaznaczono na poniższym rysunku.

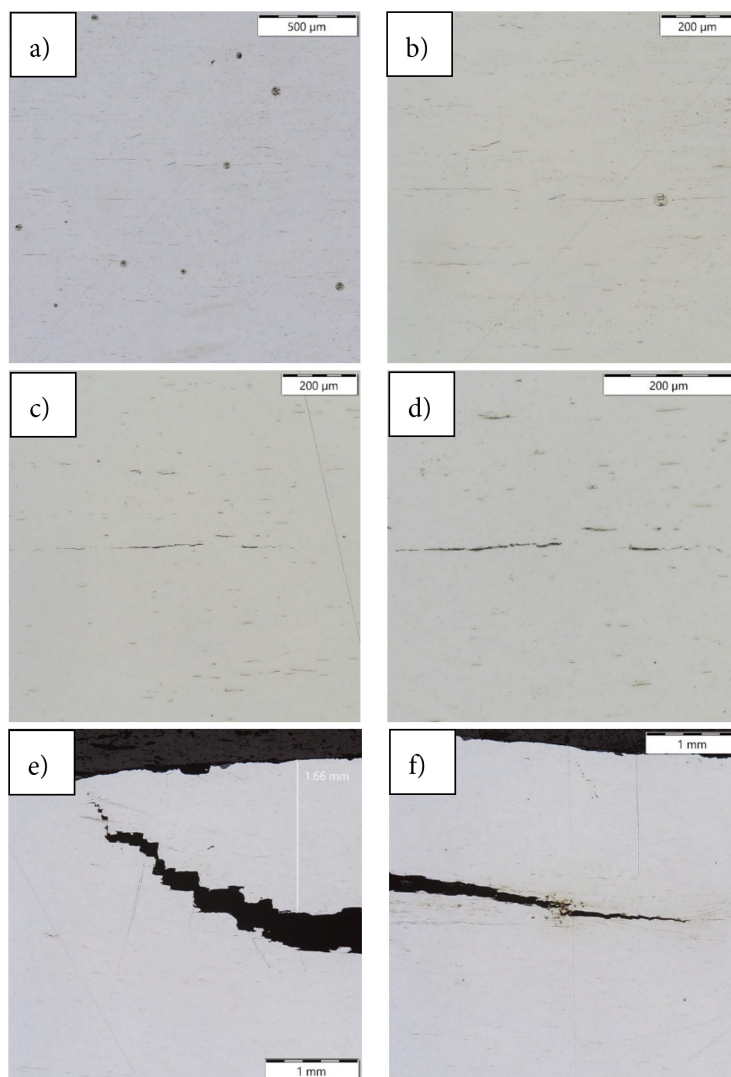
## 11. Wyniki badań metalograficznych

Obserwacje przeprowadzone na próbce nr 1, w miejscu, gdzie badania ultradźwiękowe wykazywały dużą ilość drobnych wskazań, wykazały obecność znacznej ilości wtrąceń niemetalicznych różnych rozmiarów, niekiedy

tworzących skupiska, układających się wzdłuż kierunku walcowania blachy (równoległe do powierzchni). Zatem słuszną była interpretacja tych wskazań jako wad produkcyjnych.

Na zglądzie próbki nr 2 zaobserwowano liczne wtrącenia niemetaliczne oraz pęknięcia przebiegające wzdłuż wtrąceń, łączące się ze sobą i tworzące rozwarstwienia materiału. Prawdopodobnie są to pierwsze stadia tworzenia się pęcherzy wodorowych, w których ciśnienie gazu nie wzrosło jeszcze do poziomu powodującego odkształcenie plastyczne materiału i powstanie charakterystycznego wybrzuszenia.





**Rys. 14.** Wyniki badań metalograficznych wykonanych na przekroju próbki nr 1 (a, b), nr 2 (c, d), nr 3 (e, f); zglądy nietrawione  
**Fig. 14.** Results of metallographic tests performed on the cross-section of sample No. 1 (a, b), No. 2 (c, d), No. 3 (e, f); non-etched specimens

W próbce nr 3 wyraźne jest już odkształcenie plastyczne materiału (wybrzuszenie pęcherza) oraz charakterystyczne schodkowe pęknięcie typowe dla wodorowych mechanizmów niszczenia metali. W pobliżu pęknięcia również obecne są skupiska wtrąceń niemetalicznych ułożonych równoległe do powierzchni blachy.

## 12. Podsumowanie i wyniki

Wszystkie przeprowadzone w tej pracy badania ultradźwiękowe wykazały występowanie wskazań pochodzących od nieciągłości materiałowych różnej wielkości i lokalizacji. Zastosowane techniki, dzięki zastosowaniu różnych form obrazowania graficznego i większej rozdzielczości, pozwoliły na znacznie łatwiejszą interpretację wyników niż miałyby to miejsce w przypadku zastosowania klasycznych badań ultradźwiękowych, z głowicą o pojedynczym przetworniku, opartych na analizie poszczególnych impulsów (zobrazowań typu A). Zastosowane różne rodzaje obrazowania pozwoliły nawet na określenie rodzaju i pochodzenia nieciągłości. Odróżniono nieciągłości pochodzące z procesu produkcyjnego od

nieciągłości powstałych w trakcie eksploatacji urządzenia, a nawet określono stadium powstawania uszkodzeń w formie pęcherzy.

Badania metalograficzne przeprowadzone na przekrojach poprzecznych blachy z różnego rodzaju nieciągłościami potwierdziły interpretację wyników badań ultradźwiękowych.

## 13. Bibliografia

- [1] M. Śmiałowski, Wodór w stali, WNT, 1961.
- [2] Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, ANSI/API RP 571, 3rd edition, 2020.
- [3] [Online]. Available: <https://faculty.kfupm.edu.sa/me/hussaini/corrosion%20Engineering/04.07.03.htm>. [Data uzyskania dostępu: 27 sierpień 2023].
- [4] Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications, Olympus, Third Edition, 2014.
- [5] Badania ultradźwiękowe techniką czasu przejścia wiązki dyfrakcyjnej, Materiały szkoleniowe UT2-TOFD, Instytut Spawalnictwa, 2018.
- [6] TULA technique. Innovation to solution, Lavender International NDT USA, LCC, 2018.