

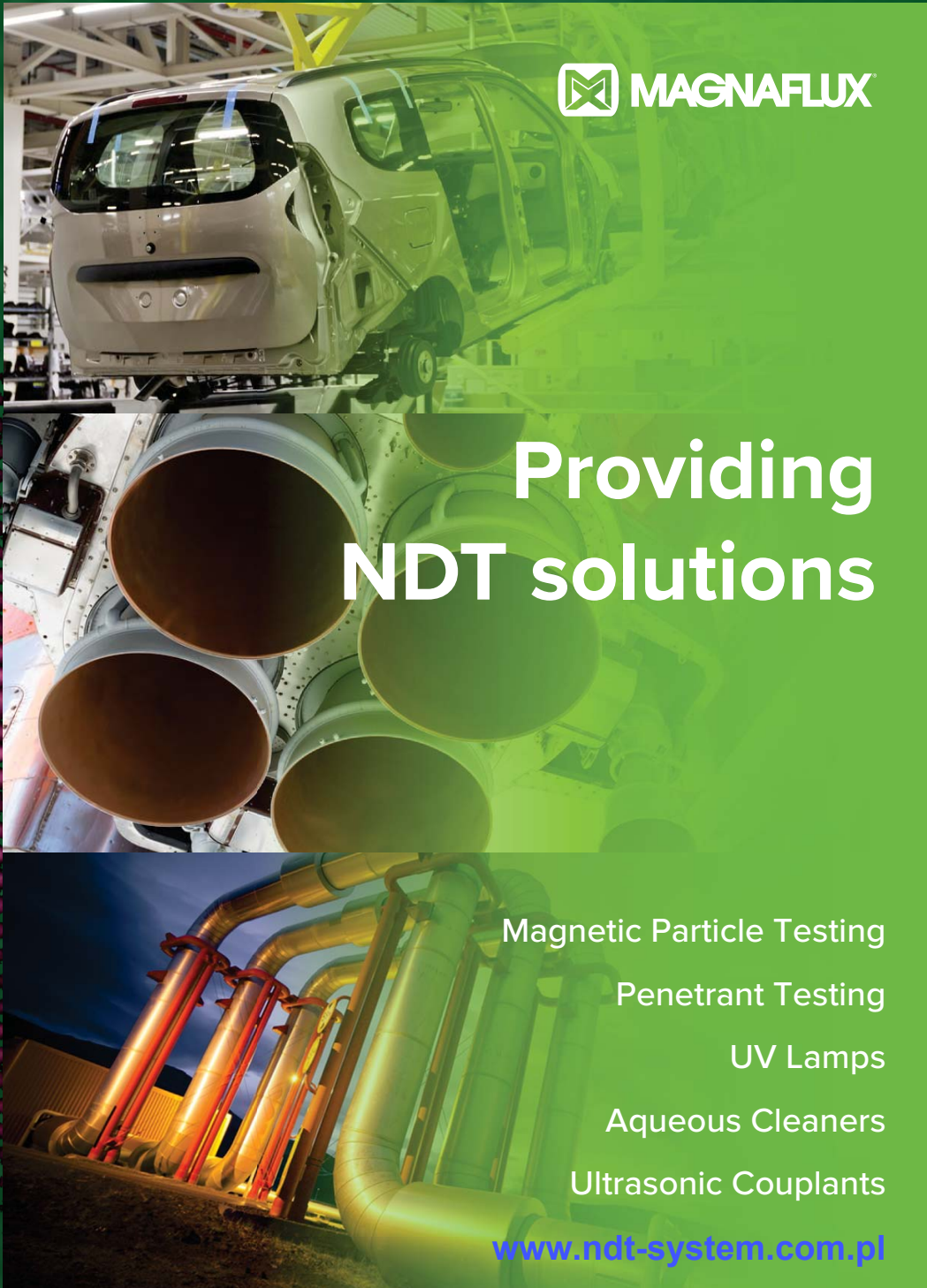
Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

50. KKBN

www.kkbn.pl



 **MAGNAFLUX**

Providing NDT solutions

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

www.ndt-system.com.pl

DXR75P-HR

Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75 μm , 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@ptbnid.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 – Górnosłaski 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 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 plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM** 124

Informacje dla Autorów i Czytelników 125

* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Maciej Martyna*, Roman Martyna

Członkowie O.I.P.E.E.C. Międzynarodowej Organizacji d/s. Badania Trwałości Lin
Laboratorium LRM-NDE, Zabierzów

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

Possibilities and limitations of the magnetic MRT method for investigating the technical condition of wire ropes during their service life

STRESZCZENIE

Liny stalowe są najsłabszymi elementami urządzeń linowych, w czasie eksploatacji druty lin ulegają degradacji spowodowanej zmęczeniem materiału przy wielokrotnym przeginianiu, powierzchniowym starciem, korozji i uszkodzeniem mechanicznym. Okres użytkowania lin jest krótszy niż urządzenia linowego na którym są zainstalowane. O konieczności odłożenia liny z eksploatacji decyduje najbardziej zużyty odcinek. Do tej pory szeroko stosowane i standaryzowane badania niszczące określające ABL (Actual Breaking Load) jak i inspekcja wizualna VT (Visual Testing) lin stalowych nie dają zadowalających rezultatów, a przy zastosowaniu nowoczesnych wielowarstwowych kompaktowanych konstrukcji lin o dużych średnicach nie pozwalają wykryć degradacji zmęczeniowej drutów w linie. Jedynie zastosowanie badań MRT (Magnetic Rope Testing) umożliwia wykrycie całego spektrum uszkodzeń występujących w czasie eksploatacji lin stalowych. Badania NDT lin decydują o bezpieczeństwie pracy i kosztach eksploatacji urządzeń linowych. W artykule opisano warunki eksploatacji lin stalowych na dźwignicach w przemyśle morskim oraz posłużono się przykładem krytycznego uszkodzenia, które wykazuje konieczność priorytetowego zastosowania metody MRT w celu określenia stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na dźwignicach. Model matematyczny [L-10] dla metody MFL rozwijany jest w Laboratorium LRM-NDE od ponad 40 lat. Aktualny poziom jego zaawansowania pozwala badać wpływ parametrów uszkodzeń i czujników na przebieg i wartość używanych impulsów diagnostycznych.

Słowa kluczowe: Liny stalowe; MRT; Inspekcje lin stalowych; Dźwigi.

ABSTRACT

Wire ropes are the weakest parts of rope installations, during their utilization the rope wires are subject to deterioration caused by fatigue of material from repeated bending, surface abrasion, corrosion and mechanical damage. The lifetime of wire ropes is shorter than the lifetime of wire rope installation on which they are installed. The need to remove a wire rope from service is often determined by the most worn section. To date, widely used and standardized destructive tests determining ABL (Actual Breaking Load) as well as VT (Visual Testing) inspection of wire ropes do not give satisfactory results, and with modern multilayer/compact rope designs do not allow to detect fatigue deterioration of wires in the wire rope. Only the use of MRT (Magnetic Rope Testing) testing allows the detection of the entire spectrum of damage occurring during the service life of wire ropes. This article describes the operating conditions of wire ropes on cranes in the offshore industry and uses an example of a critical defects that demonstrates the need to use the MRT method as a priority to determine the technical condition of wire ropes during their utilization on cranes. The mathematical model [L-10] for the MFL method has been developed in the LRM-NDE Laboratory for more than 40 years. Its current level of sophistication allows the influence of defect and sensor parameters on the course and value of the diagnostic indications obtained to be studied.

Keywords: Wire ropes; MRT; Wire ropes inspections; Cranes.

1. Wstęp

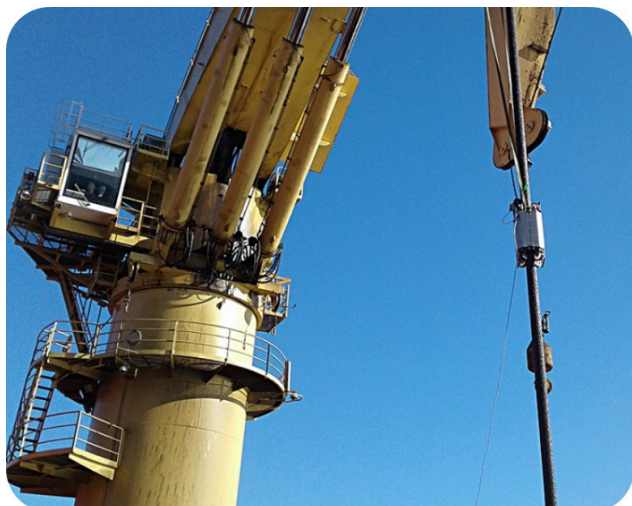
Światowe zapotrzebowanie na coraz większe i wydajniejsze urządzenia dźwignicowe szybko rośnie. W ślad za zapotrzebowaniem rynku, producenci lin konstruują liny o coraz większych średnicach, zróżnicowanej konstrukcji, a urządzenia dźwignicowe zwiększają swoje udźwigi, wydajność i prędkości operacyjne, jednocześnie obniżając współczynnik bezpieczeństwa. Szczególnie w przemyśle

morski, przy wydobyciu ropy i gazu, urządzenia dźwignicowe opuszczają i podnoszą swobodnie wiszące ciężary o znacznych masach. Do tych operacji mają zastosowanie wielowarstwowe liny o obniżonej odkrętności, a średnice lin stalowych dla tych instalacji mogą dochodzić do 165 mm, w znaczącej większości przypadków o powierzchniowym styku drutów (liny kompaktowane).

Szeroko pojęta metoda MRT (Magnetic Rope Testing) jak i urządzenia do jej implementacji są już znane od dziesięcioleci [15], jednak stosowanie tej metody w przemyśle dźwignicowym (Rys.1.1 i Rys.1.2) można uznać jako

*Autor korespondencyjny.

E-mail: LRM-NDE@LRM-NDE.CO



Rys. 1.1. Inspekcja MRT liny dźwigowej 128mm.

Fig. 1.1. MRT Inspection of Crane Wire rope 128mm



Rys. 1.2. Inspekcja MRT liny wysięgnika w systemie wielokrążkowym, dźwigu 5000T.

Fig. 1.2. MRT Inspection of boom wire rope in multi-fall system, 5000T Crane

początkowy etap, a ogólną standaryzację urządzeń i personelu za nieuregulowaną.

Zebrane doświadczenia z ostatnich lat z ponad 1000 przeprowadzonych inspekcji MRT lin stalowych na systemach dźwigowniczych pozwoliły na pogłębienie wiedzy na temat zachowania lin stalowych w czasie eksploatacji w warunkach morskich, a dzięki dodatkowym badaniom laboratoryjnym na próbkach lin zebranych po odłożeniu, umożliwiły sprawdzenie metody MRT w wykrywaniu defektów występujących w nowoczesnych konstrukcjach lin stalowych. Podstawy metody MRT zostały opisane w [5],[10],[11],[15], oraz w artykule [6] opublikowanym na 46 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących w 2017.

2. Warunki pracy lin stalowych na dźwignicach morskich

Należy zwrócić uwagę na morskie środowisko pracy, które można określić jako wysoko korozyjne. W zależności od akwenu na jakim wykonywane są prace, można spotkać diametralnie różne warunki atmosferyczne. Jednak generalnie liny stalowe narażone są na kontakt ze słoną wodą, która penetruje również do wnętrza liny ze względu na ciśnienie panujące na dużych głębokościach dochodzących nawet do 2500m oraz wilgotnym, słonym powietrzem, które często można spotkać w rejonach tropikalnych. Spotyka się też akwenu, gdzie wysycenie H_2S jest duże, co może wpływać na kruchość stali. Starcia mechaniczne drutów, spowodowane pracą liny w kontakcie ze stalowym rowkiem krążka linowego zostały znacząco ograniczone poprzez zastosowanie kompaktowanych konstrukcji lin. W tej konstrukcji powierzchnia drutów warstwy zewnętrznej mającej kontakt z rowkiem krążka linowego jest istotnie większa w porównaniu z linami o drutach okrągłych. Wyżej wymienione aspekty pracy przyspieszają zużycie lin stalowych, jednak głównym czynnikiem decydującym o okresie bezpiecznej eksploatacji liny jest jej trwałość zmęczenia, ilość możliwych do osiągnięcia cykli gięcia, aż do powstania nieciągłości materiału, przerwanych drutów w linie stalowej, a co za tym idzie obniżenie parametru ABL (Actual Breaking Load) liny. Powstawanie pęknięć zmęczeniowych drutów oraz ich propagacja w linie stalowej jest skomplikowanym zjawiskiem zależnym od wielu czynników. Kluczowym parametrem dla wystąpienia zmęczeniowych pęknięć drutów jest liczba przegięć danej sekcji liny, który na instalacjach dźwigowniczych realizowana jest na krążkach linowych podczas operacji opuszczania/podnoszenia ładunku. Parametr d/D krążka linowego mieści się w zakresie 18-25.

Należy zwrócić szczególną uwagę na zróżnicowanie instalacji dźwigowniczych pracujących w przemyśle offshore, gdzie można spotkać wciągarkę wyposażoną jedynie w bęben linowy i jeden krążek kierujący liną stalową do pionu, jak również systemy wielokrążkowe, gdzie liczba przegięć liny dla jednego cyklu pracy może sięgać nawet 24.

Ze względu na wykorzystywanie dźwignic na statkach morskich, systemy olinowania powinny być wyposażony w urządzeni AHC (Active Heave Compensator). Jest to urządzenie umożliwiające kompensację wertykalnego ruchu statku na falach, co za tym idzie względnej zmiany położenia ładunku. Najnowsze systemy pozwalają na pracę przy amplitudzie fal morskich dochodzącej do 6m, co ma istotny wpływ na trwałość zmęczeniową liny. Zwiększa to bardzo znacząco ilość cykli gięcia na stosunkowo niewielkim odcinku pracującej liny, poprzez ruch oscylacyjny na krążkach linowych, dodatkowo podnosząc lokalnie temperaturę w linie nawet do $100^{\circ}C$ poprzez występujące siły tarcia. W zależności od wielkości dźwignicy, a co za tym idzie od średnicy liny stalowej i położenia bębna linowego wykonanie urządzenia AHC jest różne. Dla mniejszych średnic do około 80mm jest zazwyczaj realizowane przez oscylacyjny ruch bębna linowego. Dla lin umieszczonych na wciągarkie pod pokładem stosuje się dodatkowe koło



Rys. 3.1. Inspekcja MRT liny wysięgnika w systemie wielokrążkowym, dźwigu 5000T.

Fig. 3.1. MRT Inspection of boom wire rope in multi-fall system, 5000T Crane



Rys. 3.2. Pomiar średnicy.
Fig. 3.2. Diameter readings



Rys. 3.3. Korozja zewnętrzna.
Fig. 3.3. External corrosion



Rys. 3.4. Pęknięte druty.
Fig. 3.4. Broken wires

napinające o ruchu wahadłowym lub liniowym, co przypomina rozwiązaniem maszyny zmęczeniowe (Bending Cycles Machine) stosowane w laboratoriach badawczych.

Pozostałe występujące czynniki wymuszające odłożenie liny z użytkowania, kategoryzowane jako odkształcenia mechaniczne (permanenta zmiana geometrii liny) nie będą przedmiotem artykułu.

Dla statków pracujących w przemyśle Oil & Gas, jak i przemyśle morskich farm wiatrowych, gdzie dzienny koszt czarteru potrafi wynosić kilkaset tysięcy dolarów, kluczowym elementem wyposażenia są liny stalowe. Na statkach przykładą się szczególną uwagę do stanu technicznego lin stalowych, jak i do ich obsługi. Obsługę lin można w zasadzie ograniczyć do ponownego smarowania odpowiednim smarem, jak i kontroli jakości nawijania liny na bęben.

3. Metody określenia stanu technicznego lin stalowych

Określenia stanu technicznego lin stalowych jest różnicowane. Szeroko rozpowszechnione, jak i akceptowane określenie ABL poprzez wykonanie niszczącej próby na maszynie zrywającej (Rys. 3.1). Jest to daleko niewystarczające. Zastosowanie kryterium odkładania, gdy ABL jest mniejsze o 20% od MBL jest prawidłowe, jednak należy zwrócić uwagę, że ta niszcząca próba odnosi się zazwyczaj do odcinka liny przy zakończeniu, a nie mówi nic o stanie technicznym

pozostałej części liny. Niesie to ze sobą dwa znaczące ograniczenia takiego podejścia. Pierwsze, niejednokrotnie wymusza odłożenie z eksploatacji pozostałej części dobrej liny o długości kilku tysięcy metrów, co wpływa na poniesione koszty zakupu i wymiany, jak i na aspekty środowiskowe, związane z utylizacją i wytworzeniem nowej liny. Z drugiej strony, należy bardzo poważnie wziąć pod uwagę, że końcowa sekcja liny wcale nie musi być jej najbardziej zdegradowanym odcinkiem, co może prowadzić do pozostawienia liny w eksploatacji, która posiada wady zagrażające bezpiecznemu jej użytkowaniu. Dochodzi też czynnik poprawności wykonania badań niszczących ABL dla lin o dużych średnicach.

Kolejnym sposobem określenia stanu technicznego lin stalowych jest wykonanie badań wizualnych VT. Inspekcja wizualna jest często przeprowadzana na podstawie normy ISO 4309:2017 z zastosowaniem kryteriów odkładania w niej zawartych. Inspektor wykonujący oględziny wizualne ma za zadanie określić ogólny stan powierzchni liny (Rys.3.3), wykryć i policzyć widoczne pęknięte druty (Rys.3.4) na zadanej długości sumowania, zlokalizować i opisać wady kształtu badanej liny, jak również możliwe ogniska korozji. Inspekcja wizualna jest połączona z pomiarem średnicy liny (Rys.3.2), oraz określeniem stanu środka smarnego. Istotnym ograniczeniem zastosowania tylko tej metody do opisanego stanu technicznego badanej liny jest to, że widoczne warstwy



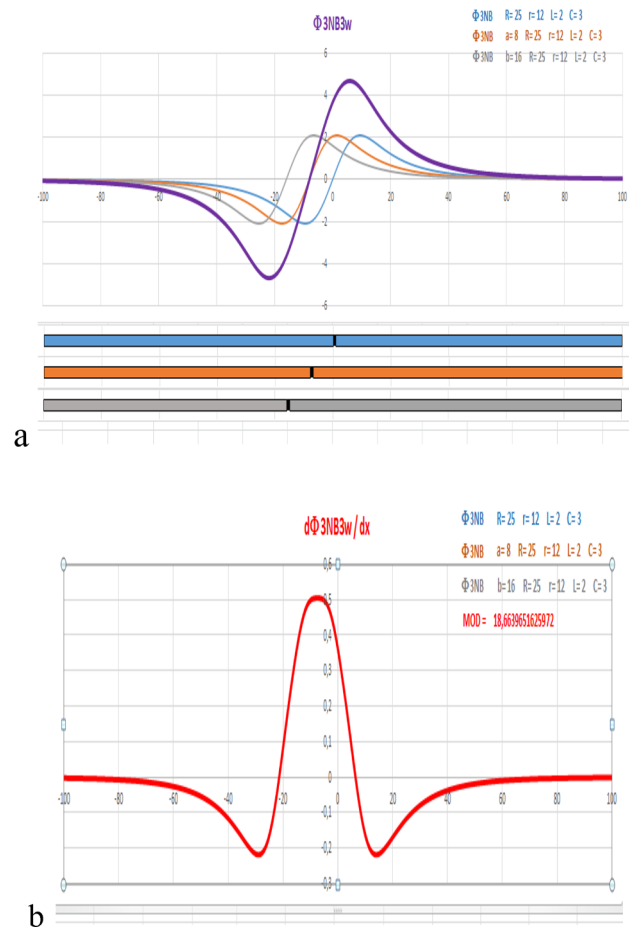
Rys. 3.5. Dr. Roman Martyna wykonujący pierwsze na świecie badanie MRT lin kotwiących platformy wiertniczej w 1985r.
Fig. 3.5. World's first MRT of Anchor ropes performed by Dr Roman Martyna in 1985



Rys. 3.6. Pierwsza na świecie inspekcja MRT lin pracujących pod wodą.
Fig. 3.6. World's first MRT inspection of ropes working underwater.

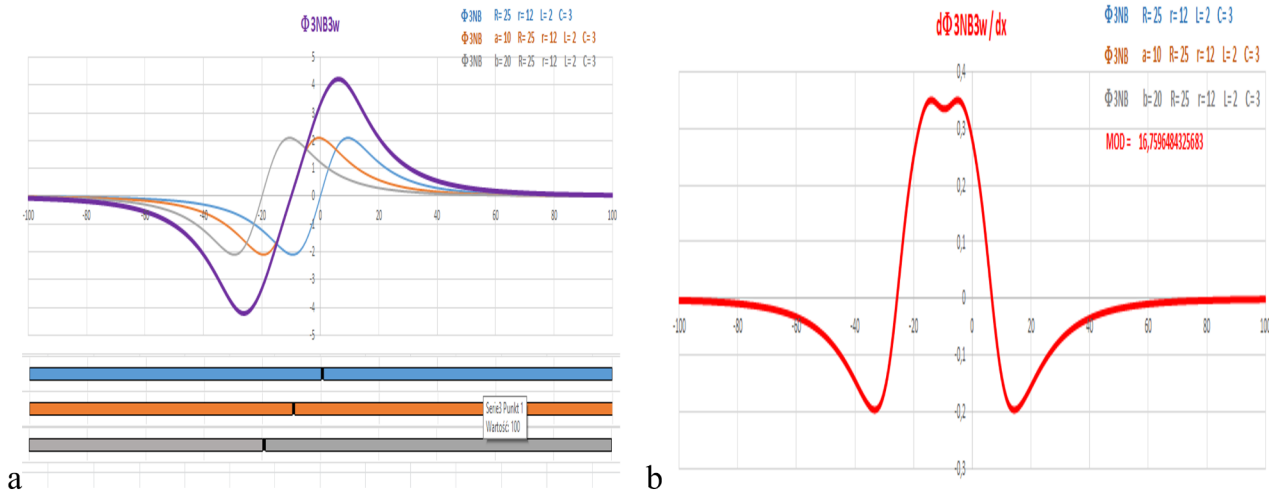
zewewnętrzne drutów w linie mogą stanowić jedynie 20% całego przekroju metalicznego liny. Dodatkowo poprawne przeprowadzenie inspekcji wizualnej jest trudne. Lina w ruchu, trudny dostęp na stanowisku inspekcyjnym, gęsty smar utrudniający pozyskanie dokładnych wyników pomiarów i oględzin, może powodować błędną ocenę stanu technicznego badanej liny. Metoda badań nieniszczących lin stalowych MRT (Magnetic Rope Testing) jest już znana od dziesięcioleci [15], jednak w przemyśle dźwignicowym zaczyna być dopiero wdrażana. Zastosowanie aparatury MRT niesie ze sobą wiele korzyści. Kluczową jest pozyskanie informacji o stanie technicznym liny stalowej w jej całym przekroju metalicznym, nie tylko o defektach nieciągłości, skutków korozji, ale również o zmianach właściwości fizycznych lin. Kolejnym aspektem jest szybkość i cena wykonania inspekcji. Aktualny rozwój urządzeń MRT, wsparcie w ocenie danych, możliwości łatwego porównania kolejnych wyników badań MRT, jak i ich katalogowanie pozwalają zredukować możliwość popełnienia błędu w interpretacji wyników badań. Aplikacja polskiej metody MRT badania lin stalowych obejmuje coraz więcej typów urządzeń linowych, często po raz pierwszy na świecie (Rys.3.5). W dźwigach morskich występują odcinki lin przeginane na krążkach nie wychodząc nigdy ponad powierzchnię wody, Laboratorium LRM-NDE skonstruowało urządzenie diagnostyczne (Rys.3.6) do badania takich lin. Jak każda metoda NDT, metoda MRT posiada swoje ograniczenia. Nie wynikają one jednak z ograniczeń możliwości aparatury, a ze zjawisk fizycznych rządzących strumieniem magnetycznym MFL rozpraszonym nad uszkodzeniami jako źródłem informacji o stanie degradacji drutów liny.

Model matematyczny [10] dla metody MFL rozwijany jest w Laboratorium LRM od ponad 40 lat. Aktualny poziom jego zaawansowania pozwala badać wpływ parametrów uszkodzeń i czujników na przebieg i wartość uzyskiwanych impulsów diagnostycznych. Przykładowy efekt symulacji wpływu tych parametrów dla najtrudniejszego problemu dla badań magnetycznych lin – zagęszczenia uszkodzeń przedstawiono na Rys.3.7 – 3.9.



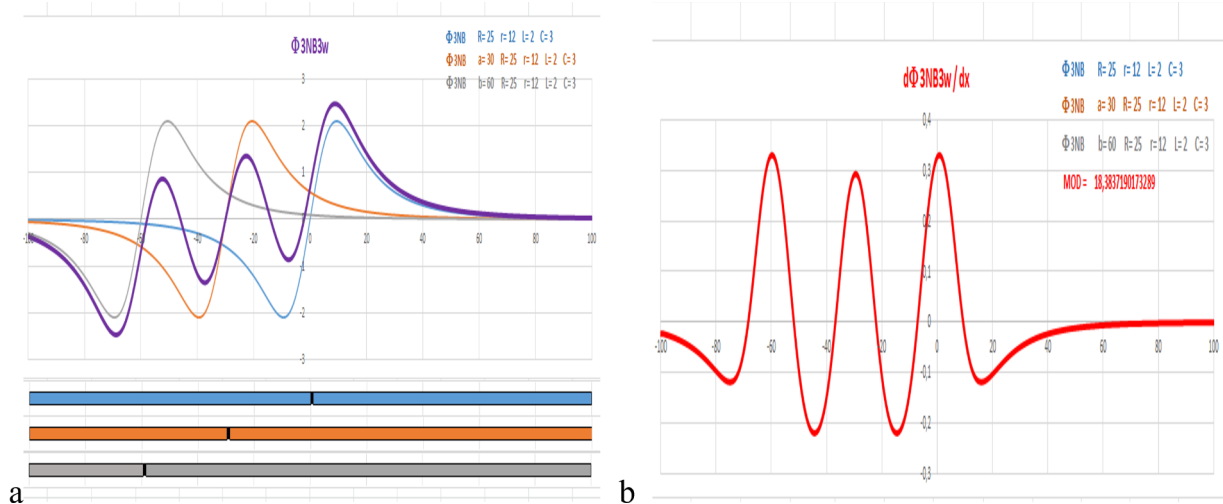
Rys. 3.7. Superpozycja sygnałów MFL od trzech przerwanych drutów zlokalizowanych w odległości a=8 i b=16mm od pierwszego. Amplituda sygnału +0,51mV.

Fig. 3.7. WSuperposition of MFL signals from three broken wires located at a=8 and b=16mm from the first one. Signal amplitude +0.51mV



Rys. 3.8. Superpozycja sygnałów MFL od trzech przerwanych drutów zlokalizowanych w odległości $a=10$ i $b=20$ mm od pierwszego. Amplituda sygnału $+0,35$ mV.

Fig. 3.8. Superposition of MFL signals from three broken wires located at $a=10$ and $b=20$ mm from the first one. Signal amplitude $+0.35$ mV



Rys. 3.9. Superpozycja sygnałów MFL od trzech przerwanych drutów zlokalizowanych w odległości $a=30$ i $b=60$ mm od pierwszego. Suma amplitud sygnałów $+0,96$ mV.

Fig. 3.9. Superposition of MFL signals from three broken wires located at $a=30$ and $b=60$ mm from the first one. Sum of signal amplitudes $+0.96$ mV

Jak przedstawiono na Rys.3.7 do Rys.3.9 wyniki badań magnetycznych MRT trzech przerwanych drutów na odcinku zagęszczenia są różne i zależą od odległości między uszkodzeniami, mimo że powodują to samo osłabienie liny.

Jednak jak do tej pory nie powstała żadna lepsza metoda badań NDT lin stalowych, która może zostać zaimplementowana w warunkach przemysłowych.

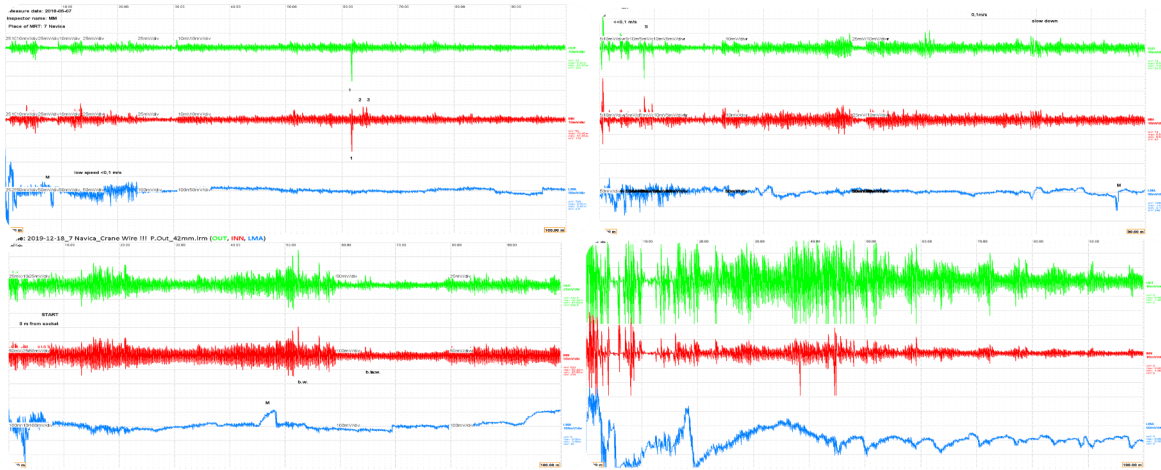
4. Możliwości metody MRT do wykrywania i oszacowania osłabienia liny

Rozpatrując wskazania na wykresach MRT można przyjąć, że różne rodzaje defektów występujących w linach stalowych są reprezentowane przez odmienne wskazania. Wstępnie możemy je podzielić na wskazania pochodzące od Lokalnych Uszkodzeń LF (Local Fault) takich jak przerwane druty lub długich zmian przekroju LMA (Loss of Metallic Area),

przykładowo utraty przekroju metalicznego związanego ze starciami mechanicznymi warstwy zewnętrznej drutów lub korozją.

W rzeczywistości interpretacja wskazań MRT jest bardziej skomplikowana i nie powinna się odnosić jedynie do klasyfikacji typowych wskazań. Przykładowo, wskazania czujników LF pochodzące od poluzowanych splotów łądząco przypominają te od przerwanych drutów. Również zmiany fizyczne w materiale drutów liny generują wskazania, które mogą być mylnie zinterpretowane. Różne typy degradacji drutów lin występują łącznie i muszą być poprawnie zinterpretowane.

Pomimo zastosowania najwyższych standardów bezpieczeństwa i obsługi lin stalowych w przemyśle Oil & Gas, nie daje to 100% pewności na uniknięcie wypadków. Jako przykład może posłużyć lina, która uległa incydentowi



Rys. 4.1. Wykresy z inspekcji liny 40mm w odstępach co około 6 miesięcy.

Fig. 4.1. Traces from inspection of 40mm wire at intervals of about 6 months



Rys. 4.2. Inspekcja wizualna.

Fig. 4.2. Visual inspection.

w czasie eksploatacji. Sam incydent nie był wynikiem błędnej interpretacji danych z inspekcji czy wyciągniętych wniosków, ale był spowodowany błędami w komunikacji i użyciu dźwigu. Jednak nie mechanizm incydentu jest istotny, a uzyskane dzięki temu dane i konkluzje z tych danych wynikające.

Opisując całe zdarzenie należy zacząć od liny stalowej. Była to lina stalowa o średnicy 40mm, konstrukcji 35(W)xK7-WSC (wielowarstwowa lina nieodkrętna), od uznanego producenta, pozostająca w ciągłej eksploatacji od około 6 lat, zamontowana na statku, na Knuckle-Boom Crane (dźwig wyposażony w hydrauliczny wysięgnik z dodatkowym ramieniem), pracujący w systemie single-fall lub double-fall. Lina ta była poddawana regularnym inspekcjom i obsłudze, zgodnie z procedurą zaimplementowaną na statku. Zgromadzone dane MRT pozwoliły na wyznaczenie krzywej wzrostu zużycia. Poniżej na (Rys.4.1) przedstawiono wykresy MRT dla pierwszych kilkudziesięciu metrów liny z 4 kolejnych inspekcji przeprowadzonych w półrocznych interwałach.



Rys. 4.3. Lina 40mm w miejscu przerwania.

Fig. 4.3. 40mm wire rope in fracture spot.



Rys. 4.4. Sekcja #2 liny po rozpleceniu.

Fig. 4.4. Wire rope sample #2 after disassemble.

Ostatnia z przeprowadzonych inspekcji odbyła się na kilka tygodni przed zaistnieniem incydentu. Jak widać na wykresach MRT przyrost amplitud wskazań jest bardzo, znaczący. Z badań wizualnych VT (Rys. 4.2) również wynikało pogorszenie się stanu technicznego tego odcinka liny, korozja zewnętrzna była widoczna, jednak nie w stopniu budzącym znaczące obawy. Klient nie był przygotowany do natychmiastowej wymiany eksploatowanej liny.

Dzięki bardzo dobrej współpracy z klientem, a także jego chęci do uzyskania wiedzy na temat przyczyn powstania zdarzenia, Laboratorium LRM-NDE udało się uzyskać odcinek liny, wraz z jednym przerwany końcem do dalszych badań laboratoryjnych (Rys. 4.3 i Rys. 4.4).

Tab. 1. Sekcja #2 liny po rozpleceniu.

Tab. 1. Wire rope sample #2 after disassemble.

| Type of wire | Diameter [mm] | MCSA [mm ²] | Tensile Strength Total [daN] | Tensile Strength [daN] used | % Ave. Reduction in TS |
|--|---------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Core - Central Wire | 2,67 | 5,599 | 1145 | 225,5 | 80,3 |
| Core - External Wire | 2,52 | 4,988 | 1015 | 297,35 | 70,7 |
| Layer 1 - Central Wire | 2,41 | 4,562 | 945 | 577,8 | 38,8 |
| Layer 1 - External Wire | 2,27 | 4,047 | 787,5 | 328,4 | 58,3 |
| Layer 1 - External Wire - Sample from fracture | 2,27 | 4,05 | 785 | 369,3 | 53,0 |
| Layer 2 - Normal Strand Central Wire | 2,56 | 5,15 | 960 | 729,3 | 24,0 |
| Layer 2 - Normal Strand External Wire | 2,42 | 4,6 | 947,5 | 513 | 45,8 |
| Layer 2 - Normal Strand External Wire - Sample from fracture | 2,42 | 4,6 | 947,5 | 485 | 48,8 |
| Layer 2 - Slim Strand External Wire | 1,75 | 2,405 | 496 | 243,7 | 50,8 |
| Layer 3 - Central Wire | 2,67 | 5,6 | 1145 | 952,7 | 16,8 |
| Layer 3 - External Wire | 2,52 | 4,99 | 985 | 680,8 | 30,9 |
| Layer 3 - External Wire - Sample from fracture | 2,52 | 4,99 | 985 | 723,6 | 26,5 |

Na próbce wykonano inspekcje wizualną wraz z dekompozycją oraz testy aktualnej siły zrywającej dla drutów w poszczególnych warstwach. Powyższe czynności wykonano dla dwóch odcinków Sekcja #1 - dokładnie miejsce przerwania. Sekcja #2- jednometrowy odcinek liny wycięty w odległości 1,5-2,5m od miejsca przerwania liny. Testy wykonane na próbce #1 potwierdziły pierwotne przypuszczenia, że przyczyną zdarzenia był bardzo duży przyrost zmęzeniowych pęknięć drutów również przyspieszony wpływem korozji.

W zewnętrznej warstwie drutów (warstwa #3) liny, druty popękały w odległości około 60cm, z typowymi przełomami zmęzeniowymi. Druty warstw wewnętrznych #1 i #2 popękały praktycznie w jednym miejscu na dystansie około 3-4cm. Siedmiodrutowa splotka rdzeniowa była kompletnie zdegradowana jeszcze przed wystąpieniem rozerwania liny.

Opisując genezę powstania zdarzenia, można stwierdzić, że szybki przyrost pęknięć zmęzeniowych warstwy zewnętrznej liny doprowadził do przekroczenia wytrzymałości pozostałego przekroju liny w stosunku do unoszonego ciężaru, co spowodowało raptowne przerwanie pozostałych drutów w warstwach liny w jednym miejscu.

Dla sekcji #2 oględziny przyniosły zaskakujące wyniki. Należy założyć, że badana lina w przerwanej sekcji, jak i w odcinku oddalonym o 1,5-2,5m od przerwania, lina pracowała w takich samych warunkach, była poddawana takim samym obciążeniom. Jednak ilość przerwanych drutów dla jednometrowej sekcji #2 wyniosła 5, wszystkie w warstwach wewnętrznych, z czego jeden to drut centralny, a 4 pozostałe zostały wykryte w jednej splotce warstwy nr 2.

Korozja również miała kluczowy wpływ na propagację powstawania pęknięć. Wpływ korozji na stan techniczny lin stalowych nie ogranicza się jedynie do ubytku przekroju metalicznego, ale również ma znaczący wpływ na lokalną koncentrację naprężenia w drutach w miejscach powstawania karbów, co obniża ich zdolność zmęzeniową. Z wewnętrznych warstw próbki #2 wyizolowano około 1,1kg produktów korozji z sekcji o długości 1m, głównie w formie metalicznego pyłu poklejonego smarem (badana lina miała masę około 7,87kg na 1m – wartość katalogowa). Z dwóch

badanych próbek liny wycięto po kilka pojedyncze druty z każdej warstwy i podano próbie zrywania, na maszynie zrywającej. Następnie wyniki zebrano i uśredniono z odrzuceniem najbardziej rozbieżnych wartości, co przeważnie odpowiadało przerwaniem drutu w szczęce maszyny. Tabela 1 opisuje zebrane wyniki.

Ostatnia kolumna tabeli wskazuje utratę (redukcję) aktualnej siły zrywającej dla drutów z próbek używanej liny w porównaniu do aktualnej siły zrywającej dla tego egzemplarza liny po procesie produkcji. Porównanie było możliwe dzięki informacjom zawartym w certyfikacie produkcji liny.

Wyniki dla dwóch odcinków lin pokazały, że wytrzymałość pojedynczych drutów w linie jest na podobnym poziomie, co potwierdza tezę o pracy próbek w takich samych warunkach. Co jednak jest najistotniejsze, badania wykazały, że druty o najwyższej aktualnej sile zrywającej (wytrzymałości statycznej) i o najmniejszym obniżeniu jej wartości w stosunku do liny nowej pękły w pierwszej kolejności. Związane jest to z wytrzymałością zmęzeniową materiału. Ze względu na kształt pojedynczych drutów (drut po procesie kompaktowania nie jest już okrągły) jak i dużym poziomem zmęczenia materiału, nie wykonano dokładnych badań wytrzymałości na przeginanie. Zaobserwowano, że druty warstwy zewnętrznej praktycznie łamały się w rękach, po jednokrotnym przegięciu, a dla wewnętrznych warstw drutów takie zjawisko nie występowało.

5. Podsumowanie

Przykład przedstawiony w artykule jest dowodem na twierdzenie, że zastosowanie jedynie testów określających ABL lub inspekcji wizualnej może być niewystarczające do określenia faktycznego stanu liny. W odległości 1,5m od kompletnego przerwania liny widoczne symptomy zmęzeniowego zużycia były znikome, a odcinek rozpatrywany znajdował się kilkadziesiąt metrów od zakończenia. Błędny jest myślenie, że samo zastosowanie aparatury MRT rozwiązuje wszystkie problemy. Aparaturę MRT należy traktować jako wyposażenie wyszkolonego i doświadczanego inspektora, jednak z założeniem, że powinna ona mieć priorytet w zastosowaniu. Ocena stanu

technicznego lin stalowych powinna być oparty na każdej dostępnej metodzie badawczej i wiedzy na temat użytkowania danej liny w celu poprawnej interpretacji danych, ponieważ równie istotne jest wyznaczenia wartości osłabienia, jak i znalezienie genezy powstania defektów.

6. Literatura

- [1] Martyna M. Czujnik selektywny defektografu magnetycznego. Zgłoszenie Patentowe WIPO ST 10/C PL440721.
- [2] Martyna R. Martyna M.: Czujnik kompaktowy defektografu magnetycznego. Patent PL 223917 B1 Listopad 2016
- [3] Bonetti C., Martyna R., Martyna M. The New Frontier of NDE Using a Combination of MRT, 3D Measurment and Vision System. Rope Present and Future OIPEEC Conference La Rochelle, France 2017 ISBN: 978-0-9552500-4-0
- [4] Błażej R., Domański A., Jurdziak L. Martyna M. Prognozy zmian stanu rdzenia taśm typu ST na postawie czasu pracy odcinków taśm i długości przenośnika. Mining Science; Fundamental Problems of Conveyor Transport. Wrocław 2014r. ISSN 2353-5423
- [5] Kwaśniewski J. Badania magnetyczne lin stalowych, Wydawnictwo AGH Kraków 2010. ISBN 978-83-7464-348-1.
- [6] Martyna R. Martyna M. Polska technologia badania lin stalowych najpoważniejszych urządzeń linowych na świecie. Badania Nieniszczące i Diagnostyka 4/2017 ISSN 2451-4462; 46 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących Starachowice 2017r.
- [7] Martyna R. Martyna M. LRM-XXI Diagnostic System ready for continuous monitoring high value subsea construction ropes. IMCA Rope Forum Amsterdam 2015.
- [8] Martyna R. Method of Steel Ropes Magnetic Testing Potential, Conditions and Problems, Crane Korea Volume 1 & 2 Seoul 2013
- [9] Martyna R. Wyznaczanie osłabienia lin metodą magnetyczną z zastosowaniem defektoskopu cyfrowego Praca doktorska AGH 1980r.
- [10] Martyna R. A Mathematical Model of the transformation of a Rope Defect into a Magnetic Stray Field, Round Table O.I.P.E.E.C. "How Safe is a Rope?" Cracow, 1981
- [11] Tytko A. Liny stalowe budowa własności eksploatacja zastosowania, PWN 2021
- [12] Martyna R. Method of Steel Ropes Magnetic Testing Potential, Conditions and Problems, Round Table – O.I.P.E.E.C. London 1998r.
- [13] Martyna R. An application of Hall generator sensors for determination of defects in steel ropes, Materials IX KKBN – PAN, SIMP Frombork 1979r,
- [14] Martyna R. Sensor of a Magnetic Defectograph for determination of Long section variations. European Patent No. 86102741.
- [15] Z. Kawecki, J. Stachurski: Defektoskopia magnetyczna lin stalowych. Wyd. Śląsk 1969.
- [16] Martyna R.: Martyna M. System Diagnostyczny LRM® - XXI – postęp w bezpiecznej i niezawodnej diagnostyce lin górniczych. KOMAG Gliwice 2013r.