

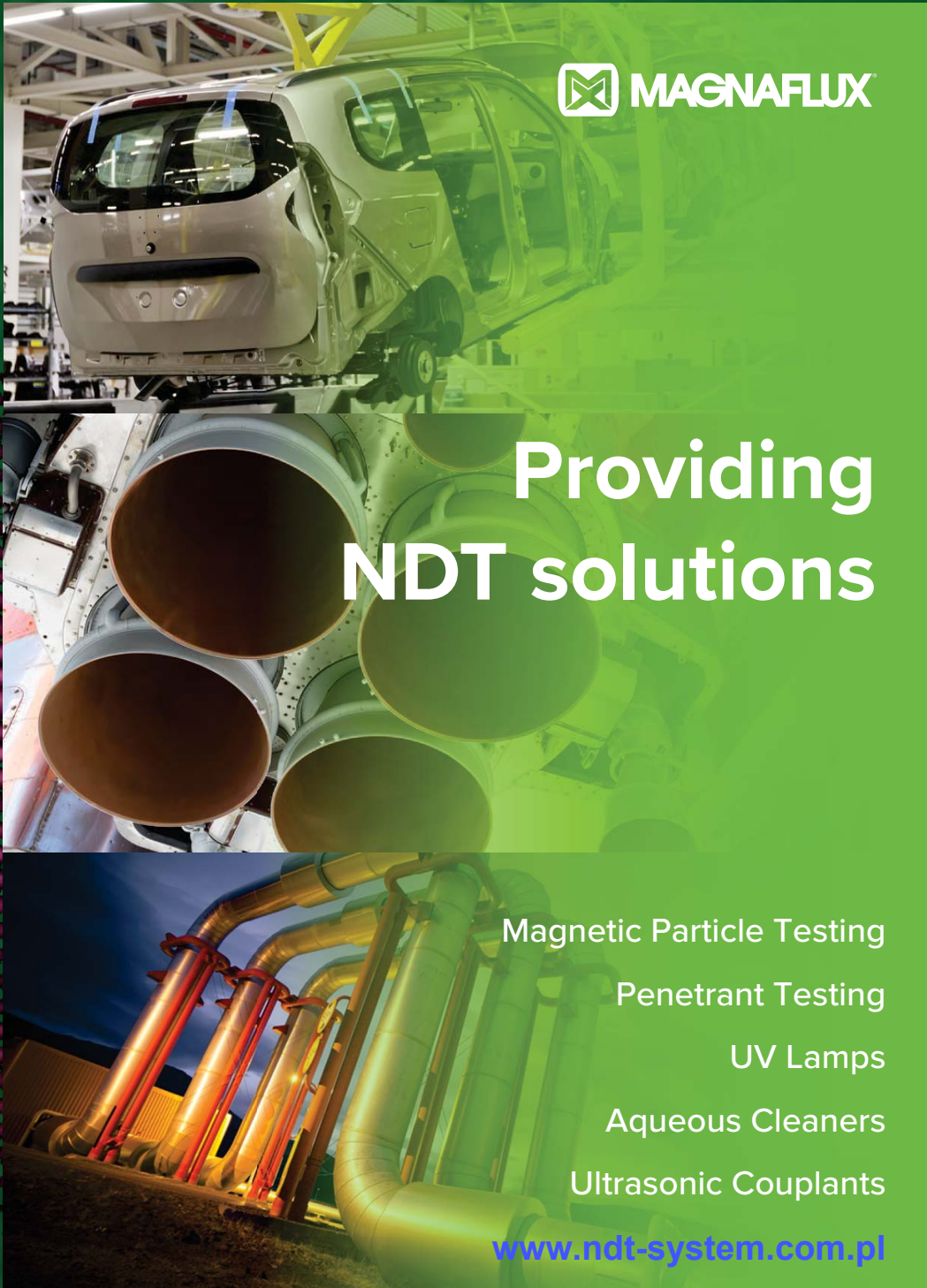
Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


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 Wrocławska, 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 Wrocławska, 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 Vártesy, *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 Obłąkowski

Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopków łopatek 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

Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obłąkowski

Koli Sp. z o.o.

Badania ultradźwiękowe Phased Array zaczepów choinkowych stopek łopat stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji

Ultrasonic Phased Array inspection of fir-tree blade roots on L-O stages, both turbine and generator sides in nuclear power plant in Sweden

STRESZCZENIE

W referacie autorzy przedstawiają prace badawczo-rozwojowe zmierzające do opracowania systemu ze skanerem i głowicą wieloelementową, procesu walidacji, procedury badawczej oraz wykonanie badań zaczepów choinkowych, łukowych stopek łopat zamontowanych na wirnikach niskoprężnych (NP) turbiny podczas postoju remontowego w elektrowni jądrowej w Szwecji.

Słowa kluczowe: Badania nieniszczące, Badania ultradźwiękowe, Badania Phased Array, Elektrownia jądrowa, Badania wirników turbin energetycznych.

ABSTRACT

In this paper, authors present research and development (R&D) work done for creating complete testing system including advanced scanner and array probe, validation process, testing procedure and conducting inspection of fir-tree hooks on curved grooves of L-0 blades roots mounted on low pressure (LP) turbine rotors, during overhaul downtime in nuclear powerplant in Sweden

Keywords: Nondestructive testing, Ultrasonic testing, Phased Array testing, Nuclear powerplant, Energetic turbine rotor testing .

1. Wstęp

Energetyka jądrowa jest dosyć młodą gałęzią przemysłu. Powstała dopiero w 1951 r. kiedy to Amerykanie po raz pierwszy wytworzyli parę w reaktorze jądrowym i zastosowali ją do napędu turbiny. Za pierwszą elektrownię jądrową uważa się obiekt otwarty w 1954 r. w Obnińsku w ZSRR, który jako pierwszy wyprodukował energię elektryczną pochodzącą z rozszczepienia jądra atomu. Natomiast za pierwszą komercyjną elektrownię uważa się obiekt w Calder Hall na wyspach brytyjskich. Do końca lat sześćdziesiątych powstało jeszcze na świecie kilkanaście różnych reaktorów określanych mianem Generacji 1. Były to bardzo różne konstrukcje, często prototypowe.

Reaktory drugiej generacji zaczęły powstawać od początku lat siedemdziesiątych i są to konstrukcje w pełni komercyjne, masowo budowane m.in. w USA, ZSRR, Francji czy Wielkiej Brytanii. Wśród nich dominują reaktory wodne ciśnieniowe PWR (lub ich radziecki odpowiednik WWER) oraz wodne wrzące BWR. Reaktory tego typu były budowane do połowy lat dziewięćdziesiątych, kiedy stopniowo rozpoczęto



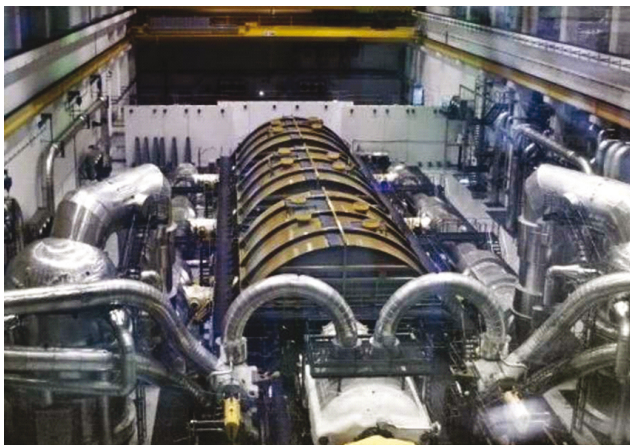
Rys. 1. Elektrownia jądrowa Forsmark z lotu ptaka – blok energetyczny nr 3 znajduje się w dolnej części zdjęcia.

wdrażanie nowocześniejszych i bezpieczniejszych reaktorów Generacji III/III+ [1].

Elektrownia jądrowa Forsmark w Szwecji, znana na świecie dzięki temu, że jako pierwsza wykryła podwyższone wskaźniki promieniowania związane z katastrofą w elektrowni jądrowej w Czarnobylu. Dostarcza ona na rynek szwedzki ok. 14% energii elektrycznej [2]. Całkowita moc wyjściowa

*Autor korespondencyjny.

E-mail:



Rys. 2. Blok energetyczny nr 3 elektrowni Forsmark – na zdjęciu widoczne są 3 korpusy wirników niskoprężnych, których diagnostykę przeprowadzał zespół Koli Sp. z o.o.

wszystkich bloków wynosi ok. 3270 MW. Budowa trzech bloków energetycznych rozpoczęła się w 1971 r. Całość ukończono i oddano do użytku w 1985 r., natomiast na przestrzeni lat wykonano szereg modernizacji, dzięki którym m.in. zwiększono moc wszystkich bloków energetycznych [3, 4].

Blok energetyczny Forsmark 3, którego dotyczy niniejszy artykuł, napędzany przez reaktor typu BWR, jest najmłodszym i najpotężniejszym z bloków, wytwarzając ok. 1190 MWe [2]. Turbozespół zmodernizowany w 2004 r. składa się z 1 wirnika wysokoprężnego (WP) i 3 wirników niskoprężnych (NP) o łącznej długości ok. 70 m [4].

Badania zostały przeprowadzone na przełomie września i października 2021 r. przez zespół firmy Koli, będący podwykonawcą generalnego wykonawcy remontu GE Power Sweden. Prace diagnostyczne obejmowały badania wizualne, magnetyczno-proszkowe i ultradźwiękowe w technice Phased Array łopatek ostatnich stopni (L-0) trzech wirników

niskoprężnych, pozostających w łożyskach własnych i w niezdemontowanych korpusach wewnętrznych, należących do turbozespołu bloku Forsmark 3.

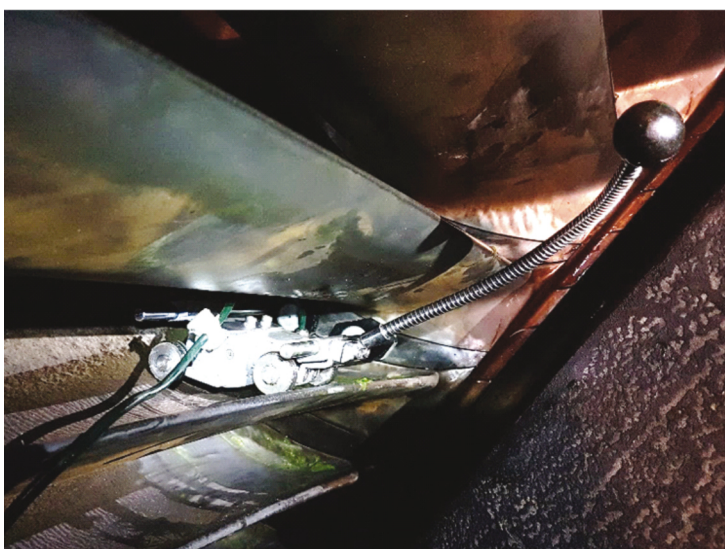
Niniejszy artykuł obejmuje krótkie omówienie prac badawczo-rozwojowych, procedur, procesu walidacji systemu badawczego oraz przeprowadzenia badań i skupiony jest na części diagnostyki obejmującej technikę Phased Array choinkowych, łukowych stopek łopat bez ich demontażu.

2. Historia badań łopatek ostatnich stopni wirników NP

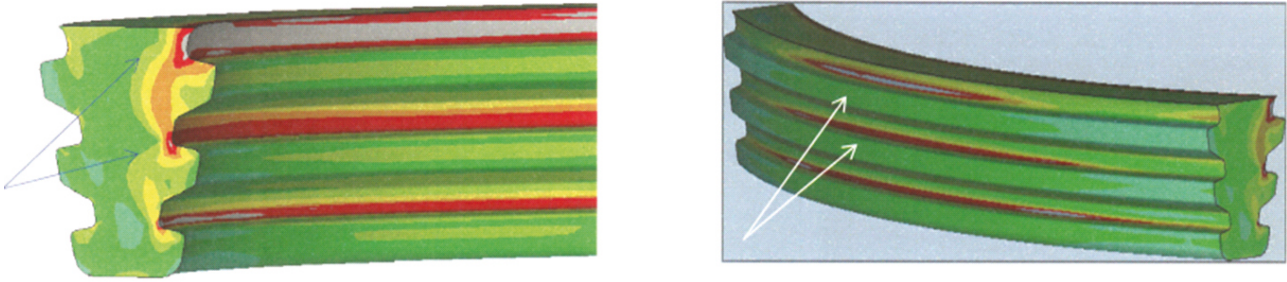
Diagnostyczne badania wrębów wału i łopatek wylotów ND37 i ND41 wirników NP energetycznych turbin parowych realizowane są w Polsce od 2006 roku przez Koli Sp. z o.o. Te pierwsze badania przeprowadzane były głównie dla Alstom Power podczas przeglądów gwarancyjnych i/lub remontowych [5, 6, 7, 8, 9].

Od roku 2012 prace były realizowane w ramach umowy o współpracy pomiędzy Koli Sp. z o.o. i Alstom Power Sp. z o.o. Miały one na celu między innymi opracowanie metodyki i zaawansowanego systemu badań stopni L-0 wirników NP bez demontażu (tzn. badań wizualnych - VT, powierzchniowych badań magnetyczno-proszkowych - MT oraz objętościowych badań ultradźwiękowych głowicami wielo-przetwornikowymi Phased Array (PA) obszarów niedostępnych dla innych badań). W roku 2016/2017 zakwalifikowaliśmy nasz projekt w konkursie na dofinansowanie prac badawczo-rozwojowych z funduszy UE w Agencji Rozwoju Pomorza [10].

Od ponad 11 lat, firma Koli posiada zaawansowane procedury i systemy badawcze, które pozwalają skutecznie, kompleksowo i szybko przeprowadzać badania piór i stopek łopatek ostatnich stopni wirników NP znajdujących się w łożyskach własnych, bez demontażu korpusów turbin. Zespół dysponuje specjalnym, dedykowanym i opracowanym w Koli Sp. z o.o. oprzyrządowaniem do badań VT, MT i PAUT.



Rys. 3 Warunki panujące podczas badania stopek łopatek wirnika NP techniką Phased Array, przeprowadzane przez firmę Koli w zamkniętym układzie przepływowym turbiny



Rys. 4. Analiza naprężeniowa zaczepów stopek łopaty, która posłużyła do stworzenia właściwych próbek odniesienia.

3. Prace badawczo-rozwojowe

Prace badawczo-rozwojowe nad systemem do badania piór i stopek łopatek ostatnich stopni wirników NP bloku energetycznego nr 3 w elektrowni Forsmark rozpoczęły się w maju 2021 r. Termin realizacji projektu był bardzo krótki, ponieważ walidacja gotowego systemu, przeprowadzona przez specjalistę z GE Power, miała odbyć się pod koniec sierpnia 2021r.

Jednym z największych utrudnień był niewątpliwie fakt, że wirniki oraz łopaty zdecydowanie różniły się od tych, które zespół Koli badał wcześniej – inne promienie krzywizny stopek i piór łopatek, mniejsza ilość zaczepów choinkowych w stopce, mniejszy odstęp pomiędzy piórami łopatek oraz znacznie większe gabaryty i masa (łopatka 124kg/sztuka). Wszystkie te czynniki sprawiły, że nie można było w pełni wykorzystać żadnego z już posiadanych skanerów – możliwe było jedynie inspirowanie się wcześniej stworzonymi i opatentowanymi przez nas rozwiązaniami.

Istotnym czynnikiem, który utrudniał, komplikował i wpływał na plan prac zespołu w roku 2021, była pandemia i ograniczona dostępność stali oraz wysoki koszt metali i ich obróbki mechanicznej, zwłaszcza dla produkcji jednostkowej i geometrycznie skomplikowanej.

Wszystkie powyższe czynniki sprawiły, że należało podjąć niekonwencjonalne działania, wykorzystać synergii zespołu, a także przeznaczyć dodatkowe środki na inwestycje, pozwalające znacznie przyspieszyć tempo prac i wykonanie systemu.

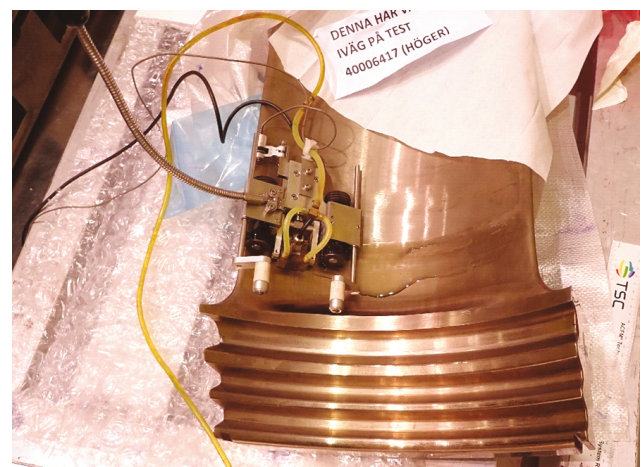
Dzięki temu, że dosyć szybko przysłano do siedziby firmy Koli jedną z zapasowych łopatek dla wirników bloku Forsmark 3, zespół zdecydował się na skorzystanie z metody inżynierii odwrotnej, czyli zeskanowanie do modelu 3D części pióra oraz całości stopki łopaty. Dodatkowo zakupione zostało nowe oprogramowanie do modelowania 3D oraz duża drukarka 3D. W ten sposób uzyskano możliwość szybkiego stworzenia dedykowanych, dopasowanych prototypów skanerów do badań PA UT.

Kolejnym krokiem była analiza kształtu stopki łopaty, określenie naprężeń związanych z charakterem pracy i geometrią łopaty oraz wyznaczenie miejsc krytycznych, w których najbardziej prawdopodobne jest powstawanie pęknięć zmęczeniowych. Na podstawie obliczeń i wyciągniętych wniosków, eksperci GE Power, w konsultacji z zespołem Koli, zaprojektowali i zlecieli wykonanie specjalnego wzorca imitującego rzeczywistą łopatę wirnika

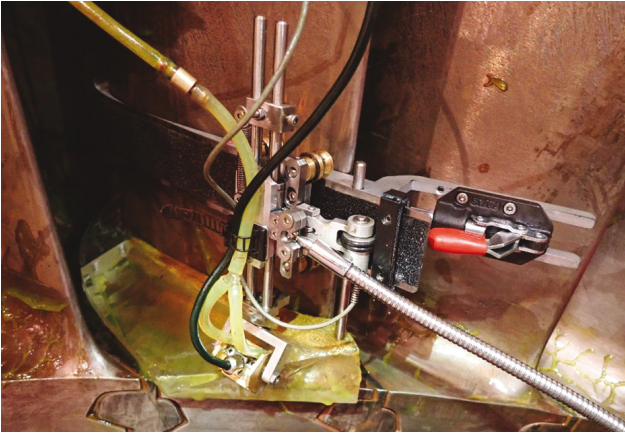
(stopkę oraz kawałek pióra), wraz z nacięciami ułożonymi pod różnymi kątami i w różnych miejscach po stronie wklęsłej i wypukłej. Tak przygotowane wzorce posłużyły do projektowania skanerów, odpowiedniego doboru dedykowanych głowic wraz z klinami oraz przeprowadzenia prób badań i walidacji systemu.

Pierwszym etapem tworzenia skanerów było przygotowanie projektu i stworzenie prototypu skanera do badania strony wypukłej (podciśnienia) stopki łopaty. Wykorzystując zdobyte już doświadczenie, zbudowano specjalny wózek z uchwytem dla głowicy i enkodera. Mocowanie głowicy zaprojektowano tak, aby zapewnić jej stały docisk do badanego materiału. W celu pozbycia się błędów odczytu, związanych z nierównomiernym rozproszaniem sprężenia, zastosowano pompę perystaltyczną, podającą środek sprężający w sposób ciągły. Ze względu na bardzo krótki termin realizacji zlecenia, zdecydowano się na zastosowanie ręcznego napędu skanera. Do badań wybrano 28-elementową głowicę o częstotliwości 5MHz oraz klin o kącie 360 ze względu na parametry i wymiary obiektu.

Znacznie trudniejszym zadaniem było przygotowanie skanera do badania części wklęsłej (ciśnienia) stopki łopaty. Wyzwaniem był kształt łopaty w miejscach wprowadzenia wiązki do materiału, który powodował konieczność zastosowania kilku różnych klinów – skanowanie z platformy,



Rys. 5. Skaner wraz z głowicą i enkoderem do przeprowadzania badań wypukłej części stopki łopaty.



Rys. 6. Klin ciągiły wraz ze skanerem, głowicą i enkoderem – system zamontowany na łopacie wirnika NP w elektrowni Forsmark.



Rys. 7. Badanie Phased Array przeprowadzane ręcznie z powierzchni bocznej stopki łopaty, w celu wykrycia wad położonych najbliższej części wylotowej (Sonatest Prisma 16:64).

z okolic przejścia pióra w platformę stopki i z pióra łopaty. Po wielu próbach, obliczeniach i modelowaniu 3D, zespół Koli wpadł na pomysł stworzenia tzw. klina ciągiłego. Idea polegała na tym, aby powierzchnię dolną klina dopasować do kształtu łopaty w miejscach wprowadzania wiązki, a górną powierzchnię klina ukształtować w 3 płaszczyznach (w 3D) tak, aby zapewnić jak najlepszą wykrywalność w miejscach spodziewanych wad.

Do tak zaprojektowanego klina dopasowano skaner z enkoderem i ręcznym napędem, aby zapewnić stały posuw głowicy po powierzchni klina. Sprzęgacz w formie żeluz był наносzony ręcznie pomiędzy klin i powierzchnie łopaty, natomiast sprzężenie pomiędzy głowicą i kształtowym klinem było zapewnione przez pompę perystaltyczną. Do badania części wklęsłej zastosowano po kilku wariantowych próbach, tę samą głowicę co do części wypukłej stopki.

Wady położone w pobliżu końca stopki łopaty, od strony wylotu, zostały przewidziane do ręcznego wykrywania bez

użycia skanera. Zastosowano defektoskop PA z 16-elementową głowicą zintegrowaną o kącie wprowadzenia wiązki do materiału 58° i częstotliwości fali 4MHz ze względu na jej wielkość, aperturę i odpowiednie właściwości fali [11, 12].

4. Walidacja systemu i opracowanie procedury badawczej

Elektrownia jądrowa to zdecydowanie jedno z najbardziej odpowiedzialnych i krytycznych miejsc w jakich można przeprowadzać badania. Zagrożenie związane z promieniowaniem i zanieczyszczeniami promieniotwórczymi dotyczy nie tylko aparatury i personelu badawczego, ale może dotknąć także osoby postronne. W związku z tym cały proces walidacji przeprowadzony przez specjalistę z GE Power obejmował nie tylko system diagnostyczny, ale również personel przeprowadzający badania.

Aby przejść proces walidacji, należało spełnić 35 punktów. Część z tych punktów obejmowała kwalifikacje, certyfikaty personelu i sprzętu oraz doświadczenie i stan zdrowia oraz niekaralność personelu.

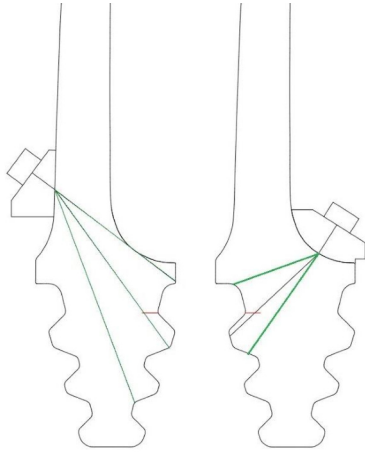
Kolejnym etapem było napisanie procedur i instrukcji badawczych, podlegających zatwierdzeniu przez GE Power i wymagających praktycznej demonstracji gwarantującej, że diagnostyka będzie prawidłowa i rzetelnie przeprowadzona, bez pominięcia któregośkolwiek z istotnych obszarów [11, 12].

Natomiast zdecydowanie najwięcej punktów procesu walidacji obejmowało system badawczy i takie zagadnienia jak:

- jakość wykonania skanerów (łatwy montaż skanerów, ich kształt i sztywność oraz trwałość, pewne zamocowanie głowicy i enkodera, płynny posuw głowicy itd.);
- sposób wykonania skanerów (powtarzalność skanowania i wykrywania wad, łatwość montażu systemów na obiekcie, czas badania jednej łopaty itd.);
- specyfikacja urządzeń (maksymalna możliwa rozdzielczość skanu, ilość dostępnych kanałów phased array, dokładność enkodera, wymiarowanie wskazań itd.);
- parametry ultradźwiękowe (maksymalny dostępny zakres badania i rejestracji, minimalna wielkość wykrywanej wady, stosunek sygnału wady do szumu itd.);
- ośrodek sprzęgający (czy zawiera inhibitory korozji, sposób jego nanoszenia na łopatę, sposób zapewnienia stałej jakości sprzężenia itd.);

Oprócz spełnienia wszystkich punktów tabeli walidacji, kluczową kwestią było przeprowadzenie badań na łopacie walidacyjnej, czyli specjalnej próbce odniesienia imitującej kształt badanej łopaty oraz eksploatacyjne pęknięcia zmęczeniowe w miejscach wyznaczonych doświadczeniem i analizą.

Należało wykryć łącznie co najmniej 80 % wszystkich nacięć, które znajdowały się na zaczepach stopek łopat, zarówno po stronie ciśnienia, jak i podciśnienia. Nacięcia wykonane zostały pod różnymi kątami w osi poziomej oraz pionowej. Autorom artykułu udało się spełnić wszystkie wymagania i wykryć wymaganą ilość zaimplantowanych wad.



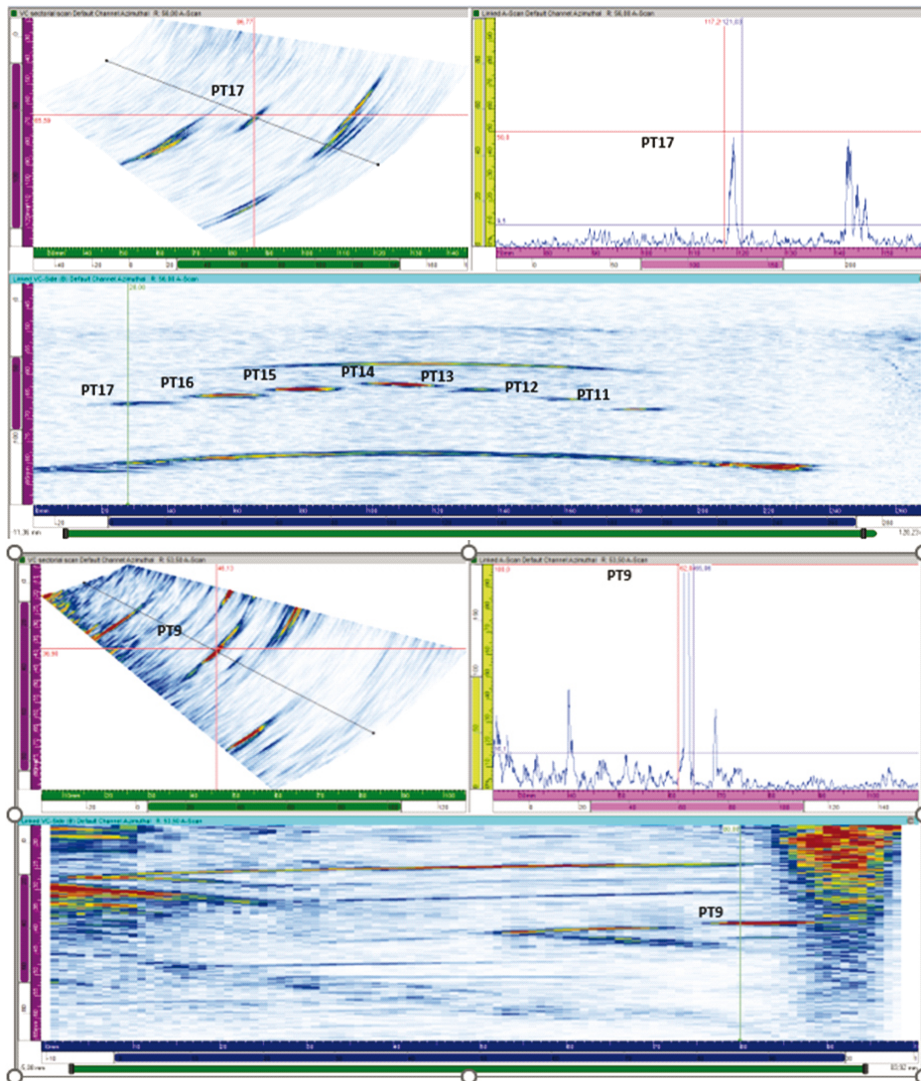
Rys. 8. Obszar pokrycia wiązką ultradźwiękową zaczerwieni stopki łopaty wraz z zaznaczonym przykładowym pęknięciem (widok z boku) – z lewej strony obszar pokrycia wiązką części wypukłej stopki łopaty; z prawej strony obszar pokrycia wiązką ultradźwiękową części wklęsłej stopki łopaty.

5. Przeprowadzenie badań wirników

Badania wirników rozpoczęły się 17 września 2021r. od szczegółowej diagnostyki wizualnej, następnie magnetyczno-proszkowej, a w ostatnim etapie ultradźwiękowej techniką Phased Array.

Dzięki wielu próbom na próbkach odniesienia, poprawkom i modernizacjom zespołu skanerów wdrażanym na bieżąco podczas prób oraz walidacji wykonanej w laboratorium Koli, badania na obiekcie nie stanowiły problemu. Wszystkie elementy systemu były bardzo dobrze dopasowane do łopat rzeczywistych wirników, a uzyskane skany były powtarzalne i dawały pewność skuteczności badania.

Wszystkie badania Phased Array przeprowadzono między 23 września i 2 października 2021r., z czego kilka dni zostało poświęconych wyłącznie na przegląd i „równoległą” analizę uzyskanych skanów. Dzięki temu personel badający miał całkowitą pewność co do uzyskanych wyników [13].



Rys. 8. Zapisy skanów wykonanych na łopacie walidacyjnej: u góry – skan części wypukłej, wraz z zaznaczonymi wykrytymi nacięciami; na dole – skan części wklęsłej od strony wylotu, wraz z oznaczonym wykrytym nacięciem

6. Podsumowanie

W ciągu około 4 miesięcy od podjęcia rozmów, uzgodnień i zlecenia z GE Power, zespołowi Koli udało się wykonać zaawansowane prace koncepcyjne i badawczo-rozwojowe oraz stworzyć kompletny system do badania zamontowanych stopek łopat ostatnich stopni wirników NP bloku energetycznego nr 3 w elektrowni jądrowej Forsmark w Szwecji.

Kompletna diagnostyka obejmowała przeprowadzenie badań wizualnych i magnetyczno-proszkowych piór oraz dostępnych powierzchni stopek łopat. Jednak to, co było prawdziwym wyzwaniem, to badanie Phased Array objętości stopek łopat w miejscach nentralgicznych, poddanych największym obciążeniom, w których zachodzi ryzyko pojawienia się krytycznych pęknięć zmęczeniowych.

Dzięki zdobytym wcześniej doświadczeniom podczas badań stopek niezdemontowanych łopat wirników niskoprężnych dla Alstom Power oraz GE Power, a także dzięki inwestycjom w najnowocześniejsze oprogramowanie oraz sprzęt do modelowania i druku 3D, udało się stworzyć kompletny zestaw skanerów, dobrać odpowiednie głowice i kliny oraz defektoskopy do realizacji rzetelnych i zaawansowanych badań.

Tym, co świadczyło o wysokiej odpowiedzialności badanej konstrukcji, był proces walidacyjny systemu badawczego i personelu NDT, w którym 35 merytorycznych punktów, dotyczących kwalifikacji i doświadczenia personelu badawczego, jakości i sposobu wykonania skanerów, specyfikacji aparatury i wyposażenia, parametrów ultradźwiękowych i jakości sprzęgacza zostało spełnionych przez zespół Koli, co dało autorom artykułu kwalifikację do przeprowadzenia badań na tak odpowiedzialnym obiekcie.

Diagnostyka, przeprowadzona przez zespół Koli na przełomie września i października 2021r. na łopatach ostatnich stopni 3 wirników niskoprężnych bloku numer 3 w elektrowni jądrowej Forsmark, jest pierwszą tego typu przeprowadzoną przez polską firmę w jakiegokolwiek elektrowni jądrowej. Przeprowadzone prace R&D i badania Phased Array stanowią o niezwykle innowacyjnym i pomysłowym podejściu do diagnostyki ultradźwiękowej oraz o ciągle dużych możliwościach drzemiących w tej technice. Szkoda, że w tak niewielkim stopniu wykorzystywane są one do utrzymania dobrego stanu technicznego „niemłodych” już krajowych bloków energetycznych.

7. Literatura

- [1] <https://www2.deloitte.com/pl/pl/pages/energy-and-resources/articles/atom-in-action/elektrownia-jadrowa-rodzaje-reaktorow-dzialanie-i-budowa.html>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Forsmark_Nuclear_Power_Plant
- [3] <https://group.vattenfall.com/se/var-verksamhet/forsmark/forsmark-nuclear-power-plant/about-forsmark>
- [4] https://group.vattenfall.com/se/siteassets/sverige/forsmark/in-english/about-forsmark/the_history_of_forsmark.pdf
- [5] Koli Sp. z o.o. – opracowania własne, prace badawcze, sprawozdania z badań ultradźwiękowych techniką Phased Array, Polska – Finlandia – Niemcy – Anglia, 2005÷2020
- [6] M. Lipnicki: „Efficient MPI application to increase safety”, Swedish National NDT Conference, Sodertalje, 22÷24.04.2007
- [7] M. Lipnicki: „Zaawansowane badania ultradźwiękowe – geneza, zalety, ograniczenia i kierunki rozwoju techniki Phased Array”, VI Międzynarodowa Konferencja, Łagów-Berlin, 09÷12.06.2010
- [8] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, M. Wójcik: „Zaawansowane badania diagnostyczne wirników turbin energetycznych techniką Phased Array na przykładzie badania kształtowych elementów mocowania łopatek”, Seminarium Badań NDT, IPPT PAN, Zakopane, 03.2011
- [9] M. Lipnicki: “High-Tech NDT diagnostic – UT PA on steam turbine LP rotors”, DEKRA, Stockholm, 11.2015
- [10] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Obłąkowski: „Badania UT PA wrębów wału i stopek łopatek stopni L-0 wirników NP turbin parowych dużej mocy – B+R i walidacja”, KKBN, Kołobrzeg, 2018r.
- [11] M. Lipnicki, K. Mroczek, R. Obłąkowski: Procedury badawcze: “VT of Turbine Blades”, “MPI of Turbine Blades & Blade Roots”, “PA Ultrasonic Inspection of Turbine Blade Roots” – Blades assembled on the rotor; Koli NDT Laboratory, Banino k/ Gdańska, 30.07÷01.09.2021
- [12] M. Lipnicki, K. Mroczek, B. Ostrowski, R. Obłąkowski, M. Cybulski, „Validation No. 28/09-2021: PREPARED for GE POWER FORSMARK-3 POWER PLANT OUTLETS of LP TURBINE ROTORS BLADES ROOT INSPECTION”
- [13] M. Lipnicki, K. Mroczek, R. Obłąkowski, M. Cybulski, M. Wójcik; „Raporty z badań VT, MT i PAUT łopat ostatnich stopni wirników niskoprężnych bloku energetycznego nr 3, przeprowadzonych w elektrowni Forsmark 3 w Szwecji”; Banino k/Gdańska, 20.10.2021r.