

Marek K. Lipnicki\*, Krzysztof Mroczek, Rafał Obłąkowski

Koli Sp. z o.o., Banino k/Gdańska

# Badania ultradźwiękowe PA osiowych wrębów wału i stopek łopatek stopni L-0 wirników NP turbin parowych dużej mocy – B+R i walidacja

## PAUT Inspection of axial steep groove and blade roots at LP steam turbine high power rotors – R&D and validation

### ABSTRACT

Based on long-standing own experiences authors present main assumptions and achievements in ultrasonic Phased Array technique R&D program for low pressure (LP) turbine rotor steep groove and blade roots inspection. Less or more complex systems applying this technique are available on the market but only few of them offer required detection level of defects essential for safe exploitation. Advanced ultrasonic PA flaw detector could not assure successful diagnostic without dedicated accessories (probes and wedges, scanner, encoder, reference blocks, software for beam steering and results analyzing) and comprehensive approach (knowledge of object geometry, defects nature and location). Authors present discontinuities revealed within blade roots in situ (closed rotor) and validation with methods ACFM, MT and next metallography applied by Koli Sp. z o.o. engineers in close cooperation with GE Power Sp. z o.o. and PGE GiEK Bełchatów.

**Keywords:** *firtree axial steep groove of turbine rotor shaft; blade roots; ultrasonic Phased Array technique; inspection in situ at closed rotor*

### STRESZCZENIE

Bazując na wieloletnich własnych doświadczeniach, autorzy przedstawiają w artykule główne założenia i osiągnięcia programu B+R w zakresie badań wrębów wału i stopek łopatek ostatnich stopni wirników niskoprężnych (NP) z zastosowaniem techniki ultradźwiękowej Phased Array. Stosowane w Polsce aplikacje tej techniki są praktycznie nieskuteczne, ponieważ nie zapewniają odpowiedniej wykrywalności uszkodzeń istotnych dla bezpiecznej eksploatacji. Zaawansowany defektoskop PA bez dedykowanego wyposażenia i kompleksowego podejścia nie zapewnia skutecznej diagnostyki osiowych wrębów i stopek łopatek wirników NP turbin energetycznych. Autorzy przedstawiają nieciągłości wykryte w zamkniętej turbinie oraz sposób weryfikacji stosowanej procedury badań. Walidacja była przeprowadzona przez zespół specjalistów z Koli Sp. z o.o. we współpracy z GE Power Sp. z o.o. i PGE GiEK Bełchatów.

**Słowa kluczowe:** *choinkowe wręby łukowe wału wirnika turbiny; stopki łopatek; technika ultradźwiękowa Phased Array; badania w zamkniętej turbinie*

### 1. Wstęp

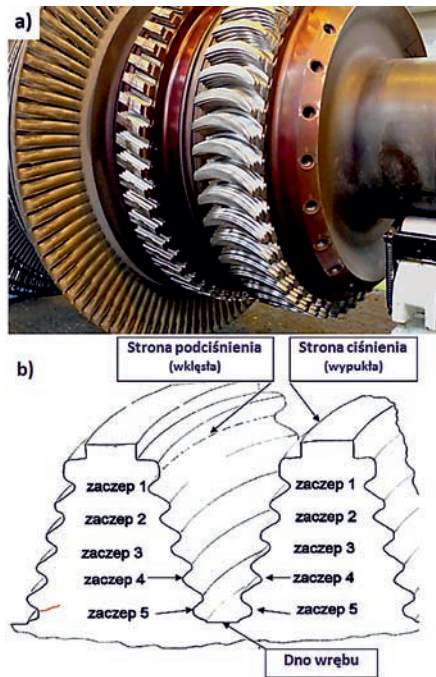
Gałęzią przemysłu, która w znacznym stopniu przyczyniła się do rozwoju ultradźwiękowej techniki Phased Array była energetyka (jądrowa i konwencjonalna, przemysłowa) [5, 7]. Stąd płynęło zainteresowanie badaniami remontowymi i między-remontowymi najbardziej newralgicznych węzłów wirników turbin energetycznych, to jest połączenia „wręb wału – stopka łopatki” bez demontażu badanych elementów. Dotyczy to zwłaszcza łopatek i wrębów ostatnich stopni wirników niskoprężnych z tzw. osiowym mocowaniem choinkowym-łukowym [1, 2]. Mocowania te stosowane są we flocie ALSTOM (GE), w turbinach 200MW, 360MW i 850MW, a także w innych maszynach oraz we flocie innych producentów.

Kształt stopek łopatek jest dopasowany do wrębów naciętych osiowo w wale. Podczas montażu stopki łopatek są „wsuwane w choinkowe” wręby, które posiadają odpowiednio kształt łukowy dla ostatnich stopni L-0 i kształt prostoskośny dla stopni przedostatnich L-1 (rys. 1a). Ten sposób mocowania umożliwia przenoszenie większych obciążeń niż

w innych rozwiązaniach [1, 2]. Znaczne wyężenie ostatnich stopni oraz specyficzne warunki pracy w ich obszarze powodują, że są one narażone na powstawanie uszkodzeń eksploatacyjnych. Do najgroźniejszych należą pęknięcia. Inicjacja tych wad zachodzi w okolicy zaczepów stopek łopatek i wrębów wału. Znaczne straty ekonomiczne w przypadku ich awarii wymuszają określenie zakresu oraz rezerwu kontroli dla bezpiecznej eksploatacji (producent turbiny), opracowanie wiarygodnych narzędzi i procedur diagnostycznych (firma NDT) oraz chęć współpracy w zakresie stosowania tych procedur (użytkownik – elektrownia). Tylko taki model współpracy oraz wysoka kultura techniczna partnerów pozwala wykryć „na czas” krytyczne uszkodzenia.

Zgodnie z zaleceniami producenta [3] kompleksowe badania diagnostyczne (przegląd „C”) łopatek i wrębów stopni L-0 i L-1 powinny być wykonane nie później niż po 50 tys. ekwiwalentnych godzin pracy (50 kEOH) od pierwszego uruchomienia lub ostatnich kompleksowych badań. Podczas tych badań łopatki stopni L-0 i L-1 są demontowane w celu dostępu do powierzchni wrębów i stopek. W połowie tego rezerwu (po 25 kEOH) producent zaleca kontrolę stopni L-0 w stanie załopatkowanym (przegląd typu B).

\*Autor korespondencyjny. E-mail: kontakt@koli.eu



Rys. 1. Osiowe wręby choinkowe ostatnich stopni wirnika NP: a) wręby proste (L-1) – po lewej, wręby łukowe (L-0) – po prawej; b) numeracja zaczepów wrębów.  
Fig. 1. Axial fir-tree steeple grooves – two last stages of LP turbine rotor: a) straight grooves (L-1) – left, curved grooves (L-0) – right; b) numbering of groove roots.

Badania techniką PAUT są bardzo przydatne podczas inspekcji stopni L-0 w stanie zmontowanym, zwłaszcza realizowanych wewnątrz układu przepływowego (przeгляд typu B).

Podczas badań wewnątrz turbiny nie ma dostępu do stopnia L-1, a do L-0 jest utrudniony oraz ograniczony. W tych warunkach możliwe są bezpośrednie badania VT i MT od strony wylotu na piórach łopatek, czołowych powierzchniach wrębów i stopek L-0. Po stronie wlotowej możliwe są pośrednie badania VT (kamera lub endoskop). Kontrolę wrębów i stopek łopatek bez demontażu, przy dobrej wiarygodności i pewności wyniku, umożliwia tylko technika PA pod warunkiem, że zachowane są zasady [7, 8, 9, 10, 11]. Dotyczy to badań wewnątrz układu przepływowego turbiny oraz także badań ostatnich stopni na „odkrytym” wirniku.

## 2. Historia prób i badań

Diagnostyczne badania wrębów i stopek łopatek wylotów ND37 i ND41 wirników NP energetycznych turbin parowych realizowane są w Polsce od 2006 roku przez Koli Sp. z o.o.. Te początkowe badania były realizowane głównie na wrębach wału dla Alstom Power podczas przeglądów gwarancyjnych i/lub remontowych na rozłopatkowanych stopniach L-0 i L-1 wymontowanych wirników NP ustawianych na kozłach z rolkami [4, 6, 7, 8, 9].

W latach 2007÷2011 podjęto próby badań wrębów choinkowych bez demontażu łopatek [7, 8]. Od roku 2012 prace badawcze 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 fazowymi PA obszarów niedostępnych dla innych badań). W roku 2016/2017 projekt spółki Koli został zakwalifikowany w konkursie na dofinansowanie prac badawczo-rozwojowych z funduszy UE w Agencji Rozwoju Pomorza.



Rys. 2. Warunki pracy podczas badań w zamkniętej turbinie: a) okno w stożku osłaniającym wał wirnika, łopalki stopnia L-0, podesty robocze po obu stronach wału; b) operator z komputerem sterującym jednostką centralną PAUT i procesem skanowania wewnątrz układu przepływowego części NP.

Fig. 2. Work conditions during Inspection in closed turbine: a) cut-out window in the rotor shaft protecting cone, L-0 stage blades, work platforms on both sides of the shaft; b) operator inside LP turbine flow system with a laptop controlling PAUT instrument and scanning process.

Badanie wrębów choinkowych wewnątrz układu przepływowego części NP.

Pierwszy etap prac był skoncentrowany na badaniach wrębów (rys. 1, 2 i 3).

W latach 2007÷2012 po cyklu opracowań i prób w symulowanych warunkach w laboratorium Koli powstały dwa różne, w pełni zmechanizowane prototypy dedykowanych skanerów, które zostały opatentowane [12]. Prototypy opracowane zostały z systemem dociskania, precyzyjnego prowadzenia i napędu dedykowanej głowicy mozaikowej PA oraz podawania ośrodka sprzęgającego pod głowicę. Próby i badania wykonano na fragmencie wrębu zaprojektowanym w Koli jako próbka odniesienia z imitacjami pęknięć w celu oceny możliwości systemu.

Następnie w latach 2010-2018 skanery te podlegały próbom, modernizacjom i adaptacji do różnych wylotów i ich wersji [9, 10, 11]. W roku 2017/2019 nasz projekt B+R miał korzystać z dofinansowania z UE (Regionalny Fundusz Rozwoju) w celu dopracowania patentów.





Rys. 3. Skaner PAUT do wrębów podczas badań stopnia L-0 – widok skanera w miejscu badania (montowany od strony wylotu pary).

Fig. 3. PAUT rotor groove scanner during L-0 stage inspection (mounted on the steam exhaust side).

Efekty kolejnych modernizacji są weryfikowane podczas badań wirników NP. Dotychczasowe próby laboratoryjne i badania w warunkach rzeczywistych potwierdziły, że opracowany system badania ostatnich stopni dedykowanym skanerem PAUT (rys. 3) jest skuteczny.

### 3. Badania choinkowych stopek łopatek stopnia L-0

Drugi etap prac wykorzystywał doświadczenia zdobyte podczas badań wrębów wału i obejmował badania stopek łopat stopni L-0 (ND37 i 41) zamontowanych we wrębach. Weryfikacja wcześniejszych ustaleń i prób przeprowadzona została na próbce odniesienia wykonanej z łopatki wycofanej z eksploatacji (L-0, ND41).

Celem prób i badań było opracowanie metodyki badań stopek łopat stopni L-0, które pozostają załopatkowane we wrębach wału wirnika NP. Próby i badania tego etapu zmierzały do:

- analizy węzła wręb-stopka i wyznaczenia miejsc krytycznych;
- wykonania próbki odniesienia ze stopki łopatki L-0 wycofanej z eksploatacji;
- doboru odpowiednich głowic PA i optymalnych obszarów skanowania wraz z parametrami ustawień dla poszczególnych obszarów (tzw. setupów zestawu aparatur-głowica);
- opracowania i zasymulowania efektywnego systemu skanowania oraz sprawdzenia zdolności wykrywania wskazań liniowych zlokalizowanych w określonych miejscach krytycznych zaczepów z ustaleniem wymaganej czułości badania;
- weryfikacji i ewentualnej modyfikacji przyjętej metodyki postępowania;
- opracowania założeń dla projektu prototypu zmechanizowanego skanera umożliwiającego badanie w rzeczywistych warunkach wewnątrz układu przepływowego części NP.

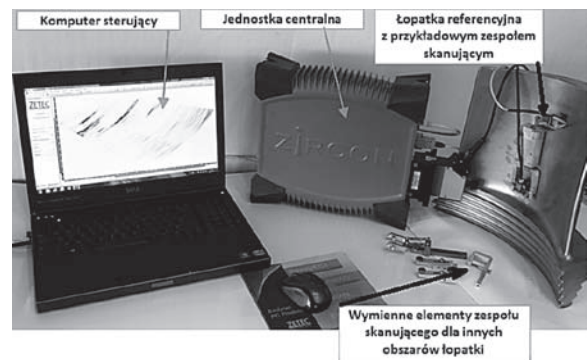
W wyniku analizy warunków pracy łopatki, kierunków obciążeń, stanów naprężeń, drgań pióra i kształtu mocowania „stopka – wręb” wytypowano miejsca, w których wykonano nacięcia symulujące wąskoszczelinowe wady eksploatacyjne (pęknięcia zmęczeniowe) imitujące rzeczywiste pęknięcia na zaczepach stopki. Posiadają one szerokość szczeliny ~0,2

mm, głębokości  $0 \div 1,0$  mm i  $0 \div 1,5$  mm oraz długości od około 7 mm do 10 mm.

Próbka odniesienia pozwoliła zweryfikować założenia teoretyczne oraz potwierdzić lub rozszerzyć możliwości i ograniczenia wyznaczone podczas pierwszych symulacji i prób badań wewnątrz układu przepływowego turbiny. Ponadto pozwoliła sprawdzić możliwości detekcji wad o różnej lokalizacji, orientacji i rozmiarze przy jednoczesnym wyborze optymalnych położen głowic PA oraz odpowiednich, zróżnicowanych nastaw systemu.

Podczas badań stopek łopatek liczba obszarów skanowania z 2 dla każdego wrębu wzrosła do 5÷6 dla każdej łopatki, a ponadto trzeba zastosować różne głowice PA i ustawienia aparatury.

Badania realizowano zestawem aparatury (rys. 4 i 5), który spełnia wymagania europejskich oraz innych międzynarodowych standardów [13, 14, 15, 16, 17].



Rys. 4. Główne składniki zestawu aparatury PAUT w systemie badawczym stopek łopat.

Fig. 4. Main parts of stepple blade root PAUT inspection system.



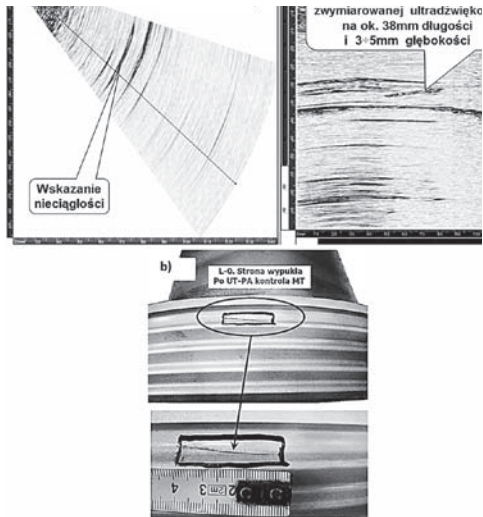
Rys. 5. Badanie stopek łopatek stopnia L-0 techniką PAUT w stanie zamontowanym.

Fig. 5. Stepple blade root PAUT inspection of the L-0 stage (without blades dismantling).

Wyniki uzyskiwane wcześniej podczas prób badań techniką PAUT stopek łopatek w stanie zamontowanym we wrębach - w warunkach rzeczywistych (rys. 2 i 5) musiały być weryfikowane innymi metodami NDT (np. metodą magnetyczno-proszkową – rys.6, 2012r. i/lub metodą ACFM – rys.7, 2018r.) po wymontowaniu łopatek wskazanych po badaniu PAUT.

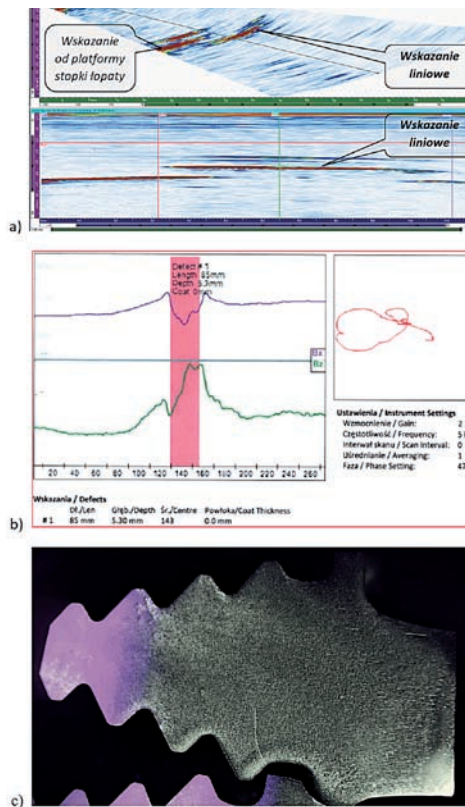
W 2018 roku stwierdzone zostały pęknięcia zaczepów 3 stopek łopatek w zamkniętej turbinie. Po wymontowaniu łopatek podjęto próby weryfikacji tych pęknięć.

W związku z tym, że łopatki wirnika wykazują właściwości ferromagnetyczne, w celu weryfikacji wyników, otrzymanych po badaniu Phased Array, zdecydowano się na zastosowanie metody magnetyczno-proszkowej.



Rys. 6. Weryfikacja wyniku PAUT stopki łopaty badanej w stanie zamontowanym: a) wskazanie wykryte techniką PA na zainstalowanej łopatkę L-0 w 2012r; b) weryfikacja lokalizacji i wymiarów wskazania metodą MT po demontażu.

Fig. 6. PAUT inspection results verification for steeply blade root: a) indication detected using PAUT on the mounted L-0 blade in 2012; b) indication localization and size verification using MPI (after blade dismantling).



Rys. 7. Weryfikacja wyniku PAUT stopki łopaty badanej w stanie zamontowanym: a) wskazanie wykryte PAUT (ok. 80mm/5mm) - 3 łopaty jednego wirnika; b) potwierdzenie wymiarów metodą ACFM - 85mm/5,3mm; c) wygląd pęknięcia po przecięciu stopki łopaty we wskazanym miejscu.

Fig. 7. Verification of the PAUT mounted steeply blade's root inspection results: a) indication detected using PAUT (about 80mm/5mm) – 3 blades from the same rotor; b) confirmation of the results using ACFM method – 85mm/5,3mm; c) crack indication using MPI method on the cut-in-half steeply blade root.

W badaniu wykorzystano certyfikowaną, fluorescencyjną zawieszinę magnetyczną oraz dwa rodzaje magnesowania – przy pomocy ręcznego elektromagnesu jarzmowego oraz prądowego defektoskopu magnetycznego zasilającego specjalną cewkę dedykowaną do badań stopek łopatek. Wbrew oczekiwaniom i maksymalnym nastawom aparatury nie stwierdzono wyraźnych wskazań na powierzchni stopki łopaty, które potwierdzałyby wyniki z defektoskopu PAUT.

Jako drugą metodę weryfikacji wybrano mało rozpowszechnioną na rynku metodę ACFM®.

Metoda ta jest dedykowana do wykrywania pęknięć zmęczeniowych, wychodzących na powierzchnię i polega na wprowadzaniu do materiału, za pomocą cewki indukcyjnej, pola magnetycznego i rejestracji, przez 2 cewki odbiorcze, zmian w zwrotnym polu magnetycznym. ACFM umożliwia uzyskanie informacji zarówno o długości wskazania, jak i jego głębokości.

Metoda ta potwierdziła wskazania, otrzymane za pomocą techniki Phased Array, na wszystkich trzech łopatkach, z dokładnością do części milimetra. Przykładowe wyniki badania ACFM dla najdłuższego wskazania znalezione na stopce łopaty, przedstawia rys. 7 b).

Wobec takich rezultatów, zdecydowano się dodatkowo przeciąć stopkę łopaty w połowie najdłuższego zarejestrowanego wskazania. Dla tak otrzymanego przekroju przeprowadzono badanie wizualne i następnie ponowne badania magnetyczno-proszkowe. Tym razem metoda MT okazała się skuteczna i potwierdziła wcześniejsze wyniki otrzymane ultradźwiękową techniką Phased Array i metodą ACFM. Rys. 7 c) przedstawia zdjęcie przekroju wraz ze wskazaniem widocznym podczas badań VT (lupa) i badań MT (UV-A).

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Doświadczenia badań wrębów wału z lat 2006-2018 i stopek łopatek z lat 2011-2018 na wylotach ND37 i ND41 oraz ND31 pozwalają twierdzić, że badania UT-PA wg opracowanego systemu są skuteczne w warunkach rzeczywistych, w tym również podczas kontroli realizowanych wewnątrz układu przepływowego [9, 10, 11].

Podczas przeprowadzonych prób sprawdzono, ustalono i/lub potwierdzono:

- dobór odpowiednich głowic PA i optymalnych obszarów skanowania wraz z parametrami ustawień (tzw. setupów „aparat – głowica”) dla poszczególnych obszarów skanowania;
- zdolność wykrywania wskazań liniowych zlokalizowanych w wyznaczonych miejscach krytycznych z odpowiednich obszarów skanowania oraz czułość zestawu na pęknięcia;
- przyjętą metodykę postępowania w trakcie prowadzenia badań;
- objętość materiału wrębu i stopki łopaty stopni L-0 niedostępną dla badań PA (rys. 8);
- założenia dla projektu prototypu zmechanizowanego skanera do badań stopek łopatek.

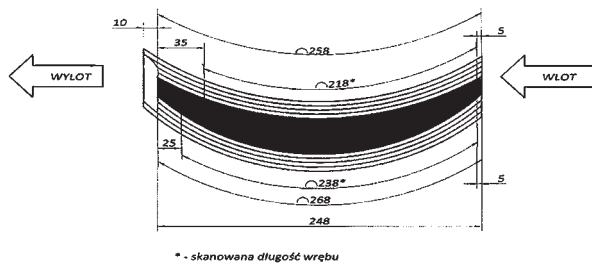
Proces badania spełnia wymagania ogólne i szczegółowe podstawowych norm dotyczących badań, w tym badań ultradźwiękowych [13, 14, 15, 16, 17], wymagania prawne



dyrektyw europejskich, jak również najlepszych praktyk GLP (ang. Good Laboratory Practice).

Metodyka badania wrębów i stopek łopatek stopni L-0 (metodyka badań, aparatura, obszary badane, sposób skanowania, kolejność operacji, zdolność wykrywania wskazań eksploatacyjnych, ograniczenia) dla różnych wylotów ND jest taka sama. Różnice wynikają z różnych geometrii danego wylotu (potrzebne są dokładne dane wymiarowo-kształtowe lub próbki referencyjne).

Badania wrębów wymagają dostępu do powierzchni wału stanowiącej wierzchołek wrębu. Konstrukcja mocowania łopatek stopni L-0 zapewnia taki dostęp, natomiast dla L-1, gdzie platforma łopatek zasłania wierzchołek wrębu, badania są niemożliwe.

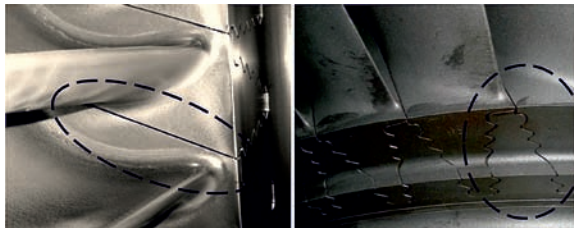


Rys. 8. Wręb stopnia L-0 – ograniczenia geometryczne dla badania PA i długości skanowane.

Fig. 8. Groove of the L-0 stage – geometrical limits for PA inspection and scanning lengths.

Badanie ultradźwiękowe techniką Phased Array z dedykowaną głowicą PA przy opracowanym systemie skanowania i przyjętej metodyce badania pozwala wykrywać wskazania liniowe o charakterze pęknięć w obszarach możliwych do skanowania i w warunkach panujących w turbinie zamkniętej kadłubem:

- dla wrębów wału stopni L-0 o głębokości od  $\sim 1,5$  mm i długości od  $\sim 5$  mm w objętości materiału wokół wierzchołków zaczepów (głównie zaczep 4 i 5 – rys. 1b).
- dla stopek łopatek stopni L-0 o głębokości od  $\sim 1,5$  mm i długości od  $\sim 7$  mm.



Rys. 9. Osiowe wręby choinkowe – skośne (L-1): niemożliwe badanie PAUT na wrębach zaopatkowanych z uwagi na brak dostępu do wierzchołka wału.

Fig. 9. Axial fir-tree grooves – straight (L-1): impossible PAUT inspection without blades dismantling – no access to the top of the groove.

W przypadku stopek łopatek stopni L-0 mamy do czynienia ze znacznie większym stopniem skomplikowania dostępu i bardziej złożoną geometrią „powierzchnia skanowania – objętość badana”. Proces badania zaczepów stopek łopatek okazał się znacznie bardziej skomplikowany niż badanie

wrębów. Konieczny jest podział badanych objętości stopki łopatek na określone ściśle sektory różnych „skanowań” i „setupów” dla uzyskania zadowalającej powtarzalności badania oraz pewności jego wyniku.

Trzeba pamiętać, że bardzo złożony kształt badanego obiektu (wrębu wału oraz stopki łopatek ze stopni L-0) stwarza objętości materiału, które są niedostępne dla badania objętościowego lub są dostępne w ograniczonym zakresie – niepewny wynik badania (rys. 8).

Podkreślić należy, że zaopatkowane stopnie L-1 charakteryzują się konstrukcją uniemożliwiającą badanie niezależnie od rodzaju wylotu - brak dostępu do wierzchołka wału między wrębami (rys. 9), który jest zasłonięty przez platformy łopatek.

## 5. Literatura/References

- [1] R. Łączkowski: Drgania elementów turbin ciepłych, WNT, Warszawa 1974
- [2] R. Łączkowski: Drgania łopatek z czołowym jodełkowym zamocowaniem. Energetyka, Nr 12, 1983, pp 463-467
- [3] GMD1 055234 – Recommendations for steam turbine inspections
- [4] Koli Sp. z o.o. – opracowania własne, prace badawcze i sprawozdania z badań ultradźwiękowych techniką Phased Array z lat 2006÷2018
- [5] M. Lipnicki: „Badania ultradźwiękowe z wykorzystaniem techniki elektronicznego sterowania wiązki fal”, XI Seminarium – Nieniszczące badania materiałów, IPPT PAN, Zakopane, 8-11.03.2005
- [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 (badania wirników turbin energetycznych)”, 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 Nieniszczących, IPPT PAN, Zakopane, 03.2011
- [9] M. Lipnicki: “High-Tech NDT diagnostic – ultrasonic PA on steam turbine LP rotors”, DEKRA, Stockholm, 11.2015
- [10] A. Seniuk, M. Miścicki, M. Lipnicki, K. Mroczek: “Badania osiowych wrębów i stopek łopatek wirników turbin energetycznych”, PIRE 2015, Ustroń, 18-20.11.2015
- [11] M. Lipnicki, K. Mroczek: “Badania UT-PA osiowych wrębów wału i stopek łopatek wirników NP turbin energetycznych”, DMiUT, Gdańsk, 29-30.06.2017
- [12] Koli Sp. z o.o.: Patent P.391040 – „Elastyczna szyna prowadząca wózek, zwłaszcza wózek skanera”, 22.04.2010
- [13] EN ISO 9712: Badania nieniszczące. Kwalifikacja i certyfikacja personelu badań nieniszczących. Zasady ogólne.
- [14] EN 583: Badania nieniszczące. Badania ultradźwiękowe -- Część 1: Zasady ogólne, Część 2: Nastawianie czułości i zakresu obserwacji, Część 4: Badania nieciągłości prostopadłych do powierzchni.
- [15] ASTM E2491-13: Standard Guide for Evaluating Performance Characteristics of Phased-Array Ultrasonic Testing Instruments and Systems
- [16] EN ISO 18563-1: Non-destructive testing -- Characterization and verification of ultrasonic phased array equipment -- Part 1: Instruments
- [17] EN 16392-2: Badania nieniszczące -- Charakteryzacja i weryfikacja ultradźwiękowych wieloelementowych systemów -- Część 2: Głowice