https://doi.org/10.7494/miag.2021.4.548.7

SŁAWOMIR STRASZAK ARTUR WIKTOR

Sheave axles of mine shaft hoists – difficulties and limitations in assessing their technical condition during in-service tests

The paper discusses the difficulties and limitations in the possibility of assessing the technical condition of sheave axles during in-service tests resulting from the lack of access to many areas of the outer surface of the axle due to built-in bearings and mounted sheaves, as well as from the complex shape of some types of axles. Examples of inservice axle failures are given and the causes are discussed. In addition, information on the legal basis for performing non-destructive testing of sheave axles in service, technical requirements for sheave axles, critical areas found in axles, theoretical basis for ultrasonic testing, and testing techniques including the latest phased array method is presented.

Key words: ultrasonic testing, UT probe, anomalies, sheave axles, cracks, difficulties and limitations

1. INTRODUCTION

Periodic testing of sheave axles as an element of the shaft hoist, for which a particularly high degree of safety is required, has been carried out in hard coal mining for more than thirty years.

Non-destructive testing is primarily used to evaluate the technical condition of sheave axles. These tests are conducted using the following methods:

- visual testing (VT),
- ultrasonic testing (UT),
- magnetic particle testing (MT).

The non-destructive character of testing, i.e. not limiting the further usefulness of an element, not causing its damage, is particularly useful for testing sheave axles.

When an axle is in operation, ultrasonic testing is most often used to avoid disassembly for testing. It is a method that in most cases gives a qualitative result, i.e. it allows to obtain information as to the location of the discontinuity, its approximate size, and sometimes even as to its type (service crack, material defect, etc.) [1]. The obtained test results can be the basis for assessing the suitability of axles for continued use in terms of their strength and technological properties. Systematic, periodic inspection makes it possible to detect potential operating defects of an axle at an early stage, to follow their development, i.e. the so-called crack propagation process during operation, thus extending its service life. Detecting in-service cracks at an early stage of formation, monitoring their propagation, also gives the right amount of time to replace the axle.

This paper focuses on the difficulties and limitations in assessing the technical condition of axles during in-service testing, discusses the origins and legal basis for axle testing, presents the current quality requirements for axles, outlines various ultrasonic testing techniques, and describes abnormalities detected in axles during testing.

2. THE GENESIS AND LEGAL BASIS FOR TESTING SHEAVE AXLES

Following the failure consisting in fatigue fracture of the sheave axle of the winding gear installed in the "Jan Henryk" shaft of the Lenin Coal Mine, which took place in 1985, the Coal Mining Department of the Polish Ministry of Economy and Energy, in its letter of 1 April 1985, no. GW4.11/209/85 and Communication no. 4/85 of 14 May 1985, determined the scope of ad hoc preventive measures, including:

- extraordinary ultrasonic testing of sheave axles and assessment of their construction in winding gears in service,
- the obligation of systematic non-destructive testing of sheave axles in periods not exceeding 5 years.

The tests mentioned above were commissioned to Central Research Laboratory of "Ziemowit" Coal Mine, the precursor of the current Research and Supervisory Centre of Underground Mining (CBiDGP).

Currently, the testing of sheave axles in mining plants is governed by sec. 3.12.6.5 of Appendix No. 4 to the Polish Regulation of the Minister of Energy of 23 November 2016, as amended, on detailed requirements for conducting underground mining operations [2].

At CBiDGP – ORiP, as an expert body performing, among others, the 3-year testing of rope sheaves, the issue of axle tests is governed by the relevant test methods and instructions [3, 4].

3. MANDATORY REQUIREMENTS FOR SHEAVE AXLES

The sheave axles for use in mine winding gears are made of steel forgings with multiple steps, supported in two places.

According to the Polish standard PN-G-46203:1996 "Górnicze wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. S. Straszak, A. Wiktor

sheaves. Requirements and testing] axles should be manufactured as open-die forgings of type A, category RR, from steel in the normalized state, in the quality class of the forgings no worse than 3 according to BN-86/0601-09 "Stal. Badania nieniszczące wyrobów hutniczych. Badania odkuwek metodą ultradźwiękową" [Steel. Non--destructive testing of metallurgical products. Ultrasonic testing of forgings] [5]. This standard has now been withdrawn and replaced by PN-EN 10228-3:2016-07, which introduces four quality classes for forgings [6]. As a general rule, it should be assumed that the requirements for the quality class of the forging intended for the axle manufacture are to be specified by the design engineer stating which standard the requirements must be met. The forging quality class is determined by ultrasonic testing. Most commonly, forgings of quality class 3 and 4 are used for sheave axles.

To avoid the notch effect, the joints between axle steps are rounded with relatively large radii. The height of the offsets, for strength reasons, should generally not exceed $h \le 0.1d$, where d is the axle diameter [7]. Both ends of the axle are free. The sheave axles are mounted in roller or plain bearings.

4. CRITICAL LOCATIONS IN THE AXLES

The axles of the sheaves are mainly subjected to alternating bending loads on both sides. Load distribution in the sheave axles is uneven. This is due to the nature of the load and the shape of the axle being adapted to work with sheaves. Therefore, locations more susceptible to cracking can be identified. These areas are called critical locations (Fig. 1) [7]. Critical locations in axles are as follows:

- in the offset area of the bearing journals (1, 2),
- in the area of the sheave seating edge (3, 4, 5, 6),
- in other offsets determined by the mounting design (7, 8).



Fig. 1. Layout of critical locations in the sheave axle

The dimensions of critical locations should be determined according to the diameter of the axle in the critical location zone. For cylindrical profile parts, this dimension is 0.25 of the diameter dimension [7].

5. THEORETICAL BASIS OF ULTRASONIC TESTING

Ultrasonic testing involves the use of the interaction between ultrasonic waves and the object being tested. The method enables the detection of discontinuities both inside and on the surface of the test piece.

Many techniques (echo, resonance, transmission, phased array, etc.) are used in ultrasonic testing, but the most popular is the so-called echo technique, which is also used for testing sheave axles.

The principle of the echo method is to transmit ultrasonic waves and receive them after reflection from discontinuities in the material or reflection from boundary surfaces.

Transmission of pulses of ultrasonic waves takes place by means of a probe with a specific transducer frequency and dimensions.

The ultrasonic wave generated by the probe propagates through the tested material and reflects off flaws, discontinuities or boundary surfaces of the tested object. The ultrasound wave, after reflection, returns to the transducer in the probe and stimulates it to vibrate. These vibrations are converted into electric impulses which, after appropriate processing in the electronic system of the flaw detector, give us the image on the screen in the form of a peak (echo) [1].

By measuring the transit time of the ultrasonic wave and knowing the speed of the wave propagation in a given material, it is possible to localize the detected discontinuities.

Single and dual longitudinal wave probes, as well as oblique, angled transverse wave probes, where the ultrasonic wave is introduced into the material at an appropriate angle, are typically used to test sheave axles. Depending on the structure of the tested material (granularity, attenuation), probes with frequencies from 1 MHz to 4 MHz are most commonly used.

A specific variation of the oblique probe is the surface wave probe, in case of which the ultrasound wave is introduced at an angle of 90° . Such probes are particularly useful for testing sheave axles cooperating with sliding bearings, allowing the detection of cracks or tears in the offset zone, which in practice eliminates the need for magnetic particle testing.

6. DIFFICULTIES AND LIMITATIONS IN CONDUCTING THE NONDESTRUCTIVE TESTING OF SHEAVE AXLES

The ultrasonic method is used as the basic method to evaluate the technical condition of sheave axles. Ultrasonic testing of sheave axles during operation can only be performed to a limited extent due to the lack of access to the entire surface of the tested axle, which is largely covered by the sheaves and bearings mounted on the axle, usually impossible to remove under operating conditions.

In addition to the limited access to many parts of the external surface of the axle, additional difficulties in testing are posed by surface irregularities (scratches, corrosion) and internal defects (manufacturing, metallurgical – applies to axles manufactured before the introduction of quality standards)

Ultrasonic testing is always preceded by a preliminary visual inspection of the axle in the condition prepared for testing.

In the case of axles with roller bearings, these will be the exposed two faces of the axle, and for axles with plain bearings, additionally the exposed sliding surfaces of the bearing journals after removal of the upper covers and half-shells.

Hence, a distinction can be made between the following basic cases for conducting the test:

- from both end faces and partially from the side face in the journal areas – the axles mating with the plain bearings (Fig. 2),
- sheave axles with roller bearings from both end faces with complete inaccessibility of the side faces.

For axles with plain bearings, the basic test is the inspection from the lateral surface with transverse wave probes (T) with angles of refraction of 45° , 60° and surface wave probes of 90° . In addition, a test with longitudinal wave normal probes (L) is performed from both faces (Fig. 2). In the case of echoes on the flaw detector screen suggesting the presence of cracks in the axle, the defective areas are subjected to magnetic particle inspection (provided that the places of possible cracks are visible and not covered by structural elements cooperating with the axle) for final verification of indications.

The testing of axles with rolling bearings is only carried out from both end faces, in several phases, using longitudinal and possibly transverse waves. Initially, high energy normal probes are used to penetrate the full length of the axle material with waves. In the front part of the axle, echoes from cracks appearing mainly in areas of section changes or under the edges of mating parts (bearings, pulley hubs) are looked for. Offset echoes are observed at the rear of the axle, the presence of which is of control significance.

The next phase, if necessary, is a detailed testing using oblique probes. This allows the ultrasonic wave beam to be directed into the corner that the hypothetical crack forms with the lateral surface of the axle (Fig. 2).

In the third stage, explaining tests are conducted to avoid the misinterpretation of the inspection results. Angled probes are used, mainly with an angle of refraction of 45° .



Fig. 2. Ultrasonic testing of sheave axle with plain bearings

One such case is the distinction of ultrasonic wave reflections originating either from the edge of a rolling bearing withdrawal sleeve or from fatigue cracks originating in the axle under that edge. As a result of the good adhesion of the sleeve to the axle and the filling of the gap with grease, the ultrasonic waves penetrate the contact surface between the components and are reflected by the edge of the sleeve. The location of the wave reflection is identified by the position of the probe on the axle face (Fig. 3) [8].



Fig. 3. Distinguishing the edge echo of rolling bearing sleeve from the axle fatigue fracture [8]

A major complication of ultrasonic inspection of sheave axles is the significant variation in their shapes and dimensions (Fig. 4 and 5).

This results in a number of apparent indications on the flaw detector screen. These are the echoes:

- associated with the flaw detector-probe system,
- arising from the transformation of ultrasonic waves at offsets, keys, etc.

Therefore, an accurate interpretation of the indications is only possible with detailed drawings of the axles and the extensive experience of the staff carrying out the inspection.

The phased array ultrasonic method offers great potential for early detection of sheave axle cracks. In this technique, phase-controlled multi-transducer (mosaic) probes cooperating with multi-channel flaw detectors are used. If during the tests performed with a standard flaw detector the occurrence of in-service fatigue cracks is suspected, the results obtained can be verified by means of the phased array technique.

The advantage of this technique over the conventional method is that having only one probe, it is possible to shape the ultrasound beam by stimulating the transducers at the right time (change the beam introduction angles and focus the beam). This allows for the selection of optimal beam insertion angles relative to the detected discontinuity (e.g., 18°). When testing with a standard flaw detector, several probes and many angle pads with different, unusual angle values would be needed. Application of phased array technology for axle and shaft testing:

- increases the effectiveness of the test allows for detection of in-service fatigue cracks in the initial stage of their formation (scanning in the full range of useful angles, and not only a few as in the case of ordinary ultrasound testing),
- allows to shorten the test time lesser number of probes used (flaw detector settings),
- facilitates the interpretation of the results (easy change of beam introduction angles it is possible to determine at what angle the signal from a possible crack is the strongest, presentation of the indication e.g. on S-scan) (Fig. 6).



Fig. 4. Example of double-groove sheave axle



Fig. 5. Example of four-groove sheave axle



Fig. 6. Phased array imaging of a fatigue crack in the single-groove sheave axle (B2SPA16 16-element 2 MHz probe, $\pm 30^{\circ}$ maximum crack indication was obtained for beam insertion angle of 14°)

7. DETECTED IRREGULARITIES IN THE SHEAVE AXLES

During tests of sheave axles, many irregularities are found in the technical condition of the axles themselves, bearing nodes and sheave hub and axle connections, which reduce the service life of the axles or even preclude their operation.

Ultrasonic detected flaws:

- Fatigue cracks. Usually caused by incorrectly manufactured axles, i.e., too small transition radii between successive offsets, resulting in a notch effect in critical areas of the axles, or too large diameter steps causing excessive stress accumulation in these areas. This is mainly the case for axles in double groove designs (Fig. 6 and 7). Sometimes fatigue cracks are initiated by corrosion pitting, often occurring at the axle-sheave hub contact surface.
- Excessive internal defectivity (i.e., excessive size and severity of defects of metallurgical origin) in critical locations. This mainly concerns the axles of old shaft hoists. These defects do not pose a direct threat to the safe operation of the axles, but under certain circumstances (stress concentration in these areas due to overloading or failure of the hoisting plant) they can cause cracks to appear.

Irregularities found during visual inspection of axles with roller bearings: the irregularities concern rather the bearings themselves and the axle to sheave hub connection.

Irregularities of axles with plain bearings:

- sharp, deep (up to about 2 mm) circumferential indentation caused by excessive wear of the bottom shell, which results in axle settling and rubbing against the bearing housing (Fig. 8),
- circumferential cracks on the sliding surface of the journals caused by contaminants getting into the oil (Fig. 8),
- corrosion spots and scuffs on the sliding surface of the journals caused by improper lubrication,
- mild, shallow, circumferential abrasion caused by the felt seal on the bearing housings,
- loose grease rings.

Axles with fatigue cracks should be replaced with new axles as soon as technically feasible, and until their replacement, crack propagation should be monitored by ultrasonic testing over a sufficiently short period of time. Remaining anomalies require immediate remediation of their causes, and axle damage should be controlled during subsequent non-destructive periodic inspections.



Fig. 7. Fatigue cracks detected during ultrasonic testing of single groove sheave axle (at second offset) – imaging using the magnetic particle testing (MT) method



Fig. 8. Circumferential scratches on the axle journal surface

8. SUMMARY

Despite the difficulties and limitations in testing sheave axles, having appropriate testing equipment and certified personnel with many years of experience in ultrasonic testing, it is possible to correctly assess the technical condition of axles during operation.

Early detection of in-service fatigue cracks gives the user adequate time to prepare for axle replacement while ensuring safe operation.

Periodic non-destructive testing of sheave axles prevents the occurrence of emergency conditions while also contributing to the extension of the period of the safe operation of sheaves in mine shaft hoists.

References

- [1] Pawłowski Z.: Badania nieniszczące. Metody ultradźwiękowe. PWN, Warszawa 1976.
- [2] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. z późniejszymi zmianami w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych: Załącznik nr 4. Dz.U. 2017, poz. 1118.

- [3] Metodyka postępowania rzeczoznawcy ds. badań nieniszczących materiałów i urządzeń górniczych No.: DM/MRS/40 [unpublished].
- [4] Technical Instruction DM/MRS/40-2 "Wykonywanie badań defektoskopowych osi kół linowych i odciskowych" – CBiDGP Issue II – August 2006 [unpublished].
- [5] PN-G-46203:1996. Górnicze wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. Wymagania i badania. 24.10.1996.
- [6] PN-EN 10228-3:2016-07. Badania nieniszczące odkuwek stalowych. Część 3: Badanie ultradźwiękowe odkuwek ze stali ferrytycznych lub martenzytycznych. 22.07.2016.
- [7] Antoniak J.: Maszyny górnicze. Część III. Transport kopalniany, Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1980.
- [8] Skorupa A., Jędrzejczak Z., Hyrnik E., Kucowicz E.: Badania ultradźwiękowe elementów urządzeń wyciągowych. Zeszyty Naukowe AGH No. 1273. Mechanika Vol. 21, Kraków 1989: 51–60.

SŁAWOMIR STRASZAK, M.Sc., Eng. ARTUR WIKTOR, M.Sc., Eng. Research and Supervisory Centre of Underground Mining in Lędziny Centre for Expert Assessment and Measurements in Mysłowice Centre for Expert Assessment and Supervising the Mining Equipment

{a.wiktor; s.straszak}@cbidgp.pl

© 2021 Authors. This is an open access publication, which can be used, distributed and reproduced in any medium according

to the Creative Commons CC-BY 4.0 License.

SŁAWOMIR STRASZAK ARTUR WIKTOR

Osie kół linowych górniczych wyciągów szybowych – trudności i ograniczenia w ocenie stanu technicznego podczas badań eksploatacyjnych

W artykule omówiono trudności i ograniczenia w możliwości oceny stanu technicznego osi kół linowych podczas badań w eksploatacji wynikające z braku dostępu do wielu obszarów powierzchni zewnętrznej osi ze względu na zabudowane łożyska i osadzone koła linowe, jak i wynikające ze skomplikowanego kształtu niektórych typów osi. Podano przykłady eksploatacyjnych uszkodzeń osi i omówiono przyczyny ich powstawania. Dodatkowo przedstawiono informacje dotyczące podstaw prawnych wykonywania badań nieniszczących osi kół linowych w czasie eksploatacji; wymagań technicznych dla osi kół linowych; obszarów krytycznych występujących w osiach; teoretycznych podstaw badań ultradźwiękowych oraz technik prowadzenia badań wraz z najnowszą metodą phased array.

Słowa kluczowe: badania ultradźwiękowe, głowica ultradźwiękowa, nieprawidłowości, osie kół linowych, pęknięcia, trudności i ograniczenia

1. WSTĘP

Okresowe badania osi kół linowych jako elementu wyciągu szybowego, dla którego wymagany jest szczególnie wysoki stopień bezpieczeństwa, prowadzone są w górnictwie węgla kamiennego już od ponad trzydziestu lat.

Do oceny stanu technicznego osi kół linowych stosuje się przede wszystkim badania nieniszczące. Badania te są prowadzone metodami:

- wizualną (VT),
- ultradźwiękową (UT),
- magnetyczno-proszkową (MT).

Nieniszczący charakter badań, tzn. niepowodujący ograniczenia w dalszej przydatności eksploatacyjnej elementu, jego uszkodzenia, jest szczególnie przydatny przy badaniach osi kół linowych.

W trakcie eksploatacji osi w celu uniknięcia konieczności jej demontażu do badań najczęściej stosuje się metodę ultradźwiękową. Jest to metoda dająca w większości przypadków wynik jakościowy, czyli pozwalający na uzyskanie informacji co do położenia nieciągłości, przybliżonej jej wielkości, a czasem nawet co do jej rodzaju (pęknięcie eksploatacyjne, wada materiałowa itp.) [1]. Uzyskane wyniki badań mogą stanowić podstawę do oceny przydatności osi do dalszej eksploatacji z wytrzymałościowego i technologicznego punktu widzenia. Systematyczna okresowa kontrola pozwala na wczesne wykrycie ewentualnych wad eksploatacyjnych osi, śledzenie ich rozwoju, czyli tzw. procesu propagacji pęknięć w czasie pracy, przedłużając okres eksploatacji osi. Wykrycie pęknięć eksploatacyjnych w początkowej fazie powstawania oraz monitorowanie ich propagacji daje również odpowiednią ilość czasu potrzebnego do wymiany osi.

W niniejszym artykule skupiono się na trudnościach i ograniczeniach w ocenie stanu technicznego osi podczas badań w czasie eksploatacji, omówiono genezę oraz podstawy prawne badania osi, przedstawiono obowiązujące wymagania jakościowe osi, opisano różne techniki badań ultradźwiękowych oraz nieprawidłowości wykrywane w osiach podczas prowadzenia badań.

2. GENEZA ORAZ PODSTAWY PRAWNE BADAŃ OSI KÓŁ LINOWYCH

W związku z awarią zmęczeniowego pęknięcia osi koła linowego w urządzeniu wyciągowym szybu "Jan Henryk" KWK "Lenin", która miała miejsce w 1985 r. Departament Górnictwa Węglowego MGiE w piśmie z dnia 1.04.1985 r. znak GW4.11/209/85 i Komunikacie nr 4/85 z dnia 14.05.1985 r. ustalił zakres doraźnych działań profilaktycznych obejmujących:

- nadzwyczajne badania ultradźwiękowe osi kół linowych i ocenę poprawności ich konstrukcji w czynnych urządzeniach wyciągowych,
- obowiązek systematycznych badań nieniszczących osi kół linowych w okresach nie dłuższych niż pięć lat.

Badania, o których mowa wyżej, zlecono Centralnemu Laboratorium Badawczemu KWK "Ziemowit", protoplaście obecnego CBiDGP.

Obecnie badania osi kół linowych w zakładach górniczych reguluje pkt 3.12.6.5 Załącznika nr 4 do *Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r.* z późniejszymi zmianami w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych [2].

W CBiDGP – ORiP jako jednostce rzeczoznawczej wykonującej między innymi trzyletnie badania kół linowych, sprawę badań osi regulują odpowiednie metodyki badań i instrukcje [3, 4].

3. OBOWIĄZUJĄCE WYMAGANIA DOTYCZĄCE OSI KÓŁ LINOWYCH

Osie kół linowych pracujące w górniczych urządzeniach wyciągowych wykonuje się jako wielostopniowe, podparte w dwóch miejscach, z odkuwek stalowych.

Zgodnie z normą PN-G-46203:1996 "Górnicze wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. Wymagania i badania" osie należy wykonywać jako odkuwki swobodnie kute rodzaju A, kategorii RR, ze stali w stanie normalizowanym, w klasie jakości odkuwki nie gorszej niż 3 według BN-86/0601-09: *Stal. Badania nieniszczące wyrobów hutniczych. Badania odkuwek metodą ultradźwiękową* [5]. Aktualnie norma ta została już wycofana i zastąpiona normą PN-EN 10228-3:2016-07, norma wprowadza cztery klasy jakości odkuwki [6]. Generalnie należy założyć, że wymagania co do klasy jakości odkuwki, z której wykonana ma być oś, określa konstruktor, podając, jakiej normy wymagania muszą być spełnione. Określenie klasy jakości odkuwki następuje po badaniu przeprowadzonym metodą ultradźwiękową. Najczęściej w przypadku osi kół linowych stosuje się odkuwki klasy jakości 3 i 4.

W celu uniknięcia działania karbu przejścia między stopniami osi zaokrągla się stosunkowo dużymi promieniami. Wysokość odsadzeń, ze względów wytrzymałościowych, na ogół nie powinna przekraczać $h \le 0.1d$, gdzie d jest średnicą osi [7]. Obydwa końce osi są swobodne. Osie kół linowych współpracują z łożyskami tocznymi lub ślizgowymi.

4. OBSZARY NIEBEZPIECZNE (KRYTYCZNE) W OSIACH

Osie kół linowych narażone są głównie na obciążenia zginające obustronnie zmienne. W osiach kół linowych występuje nierównomierny rozkład obciążenia. Wynika to z charakteru obciążenia i kształtu osi dostosowanego do współpracy z kołami linowymi. Dlatego można wyodrębnić obszary bardziej podatne na powstawanie pęknięć. Obszary te nazywa się miejscami niebezpiecznymi (krytycznymi) (rys. 1) [7]. W osiach obszary niebezpieczne występują:

- w strefie odsadzenia czopów łożyskowych (1, 2),
- w strefie krawędzi osadzenia koła linowego (3, 4, 5, 6),
- w innych odsadzeniach uwarunkowanych konstrukcją montażową (7, 8).



Rys. 1. Szkic rozmieszczenia obszarów niebezpiecznych w osi koła linowego

Wymiary obszarów niebezpiecznych ustala się stosownie do średnicy osi w strefie obszaru niebezpiecznego. Dla elementów o profilu cylindrycznym wymiar ten wynosi 0,25 wymiaru średnicy [7].

5. TEORETYCZNE PODSTAWY BADAŃ ULTRADŹWIĘKOWYCH

Badania ultradźwiękowe polegają na wykorzystaniu wzajemnego oddziaływania fal ultradźwiękowych i badanego obiektu. Metoda umożliwia wykrywanie nieciągłości zarówno we wnętrzu, jak i na powierzchni badanego elementu.

W badaniach ultradźwiękowych stosowanych jest wiele technik (echa, rezonansu, przepuszczania, *phased array* itp.), jednak najpopularniejsza jest tzw. technika echa, którą stosuje się również do badań osi kół linowych.

Zasada metody echa polega na nadawaniu fal ultradźwiękowych i ich odbiorze po odbiciu od nieciągłości w materiale lub odbiciu od powierzchni granicznych.

Nadawanie impulsów fal ultradźwiękowych odbywa się za pomocą głowicy o określonej częstotliwości i wymiarach przetwornika.

Wytworzona przez głowicę fala ultradźwiękowa rozchodzi się w badanym materiale i odbija od wad, nieciągłości, względnie powierzchni ograniczających badanego przedmiotu. Fala ultradźwiękowa po odbiciu powraca do przetwornika w głowicy i pobudza go do drgań. Drgania te zamieniane są na impulsy elektryczne, które po odpowiedniej obróbce w układzie elektronicznym defektoskopu dają nam na ekranie obraz w postaci piku (echa) [1].

Mierząc czas przejścia fali ultradźwiękowej i znając prędkość rozchodzenia się tej fali w danym materiale, można dokonać lokalizacji wykrytych nieciągłości.

Do badania osi kół linowych stosuje się zazwyczaj pojedyncze i podwójne głowice fal podłużnych oraz głowice skośne, kątowe fal poprzecznych, gdzie fala ultradźwiękowa wprowadzana jest w materiał pod odpowiednim kątem. W zależności od struktury badanego materiału (ziarnistości, tłumienia) najczęściej stosuje się głowice o częstotliwościach od 1 MHz do 4 MHz.

Specyficzną odmianą głowicy skośnej jest głowica fal powierzchniowych. W głowicy tej kąt, pod którym zostaje wprowadzona fala ultradźwiękowa, wynosi 90°. Głowice takie szczególnie przydatne są przy badaniu osi kół linowych współpracujących z łożyskami ślizgowymi, pozwalając na wykrywanie pęknięć lub naderwań w strefie odsadzeń, co w praktyce eliminuje konieczność stosowania badań metodą magnetyczno--proszkową.

6. TRUDNOŚCI I OGRANICZENIA W PROWADZENIU BADAŃ NIENISZCZĄCYCH OSI KÓŁ LINOWYCH

Do oceny stanu technicznego osi kół linowych stosuje się przede wszystkim metodę ultradźwiękową. Badania ultradźwiękowe osi kół linowych w trakcie eksploatacji można wykonywać tylko w ograniczonym zakresie z uwagi na brak dostępu do całej powierzchni badanej osi, która jest w znacznym stopniu zasłonięta przez osadzone na osi koła oraz łożyska, których demontaż jest w warunkach ruchowych zazwyczaj niemożliwy.

Poza ograniczonym dostępem do wielu fragmentów powierzchni zewnętrznej osi dodatkowymi utrudnieniami w badaniu są nierówności powierzchni (zarysowania, korozja) oraz wadliwość wewnętrzna (wytwórcza, hutnicza – dotyczy osi wyprodukowanych przed wprowadzeniem norm jakościowych).

Diagnostykę stanu technicznego osi metodą ultradźwiękową zawsze poprzedza się wstępnym i oględzinami obiektu w stanie przygotowanym do badań.

W przypadku osi z łożyskami tocznymi będą to odsłonięte obydwie powierzchnie czołowe osi, a dla osi z łożyskami ślizgowymi dodatkowo odsłonięte powierzchnie ślizgowe czopów łożyskowych po zdjęciu górnych pokryw i półpanewek.

Wobec tego można rozróżnić następujące przypadki prowadzenia badania:

- z obydwu powierzchni czołowych i częściowo z powierzchni bocznej w obszarach czopów łożysk – osie współpracujące z łożyskami ślizgowymi (rys. 2),
- z obydwu powierzchni czołowych przy całkowitym braku dostępu do powierzchni bocznej – osie kół z łożyskami tocznymi.

W przypadku osi z łożyskami ślizgowymi podstawowym badaniem jest kontrola z powierzchni bocznej głowicami fal poprzecznych (T) o kącie załamania 45°, 60° oraz głowicami fal powierzchniowych 90°. Dodatkowo przeprowadza się badanie z obydwu powierzchni czołowych głowicami normalnymi fal podłużnych (L) (rys. 2). W przypadku stwierdzenia ech na ekranie defektoskopu sugerujących występowanie pęknięć w osi wadliwe obszary poddaje się badaniu metodą magnetyczno-proszkową (pod warunkiem, że miejsca ewentualnych pęknięć są widoczne i niezasłonięte elementami konstrukcyjnymi współpracującymi z osią) w celu ostatecznej weryfikacji wskazań. Badanie osi z łożyskami tocznymi prowadzone jest jedynie z obydwu powierzchni czołowych, w kilku fazach, przy użyciu fal podłużnych i ewentualnie poprzecznych. Początkowo wykonuje się badania głowicami normalnymi o wysokiej energii umożliwiającymi spenetrowanie falami materiału osi na całej długości. W przedniej części osi poszukuje się ech od pęknięć pojawiających się głównie w miejscach zmian przekroju lub pod krawędziami elementów współpracujących (łożyska, piasty kół linowych). W tylnej części osi obserwuje się echa odsadzeń, których obecność ma znaczenie kontrolne.

Następna w razie potrzeby faza to badanie szczegółowe przy zastosowaniu głowic skośnych. Umożliwia to kierowanie wiązki fali ultradźwiękowej w naroże, jakie tworzy hipotetyczne pęknięcie z powierzchnią boczną osi (rys. 2).



Rys. 2. Badanie ultradźwiękowe osi koła linowego z łożyskami ślizgowymi

W trzecim etapie prowadzone są badania wyjaśniające w celu uniknięcia błędnej interpretacji wyników kontroli. Stosowane są głowice skośne, głównie o kącie załamania 45°.

Jednym z takich przypadków jest rozróżnienie odbić fali ultradźwiękowej pochodzących bądź od krawędzi tulei wciskowej łożyska tocznego, bądź od pęknięć zmęczeniowych powstających w osi pod tą krawędzią. Wskutek dobrego przylegania tulei do osi oraz wypełnienia szczeliny smarem fale ultradźwiękowe przenikają przez powierzchnię styku między tymi elementami i odbijają się od krawędzi tulei. Miejsce odbicia fal identyfikuje się na podstawie położenia głowicy na powierzchni czołowej osi (rys. 3) [8].



Rys. 3. Rozróżnienie echa krawędzi tulei wciskowej łożyska tocznego od pęknięcia zmęczeniowego osi [8]

Dużym utrudnieniem kontroli ultradźwiękowej osi kół linowych jest znaczne zróżnicowanie ich kształtów i wymiarów (rys. 4 i 5).

Z tego powodu otrzymujemy wiele wskazań pozornych na ekranie defektoskopu. Są to echa:

- związane z układem defektoskop-głowica,
- powstające w wyniku transformacji fal ultradźwiękowych w miejscach odsadzeń, wpustów itp.

W związku z tym jedynie dysponowanie szczegółowymi rysunkami osi i duże doświadczenie kadry badawczej umożliwia prawidłową interpretację wskazań.

Duże możliwości co do wczesnego wykrycia pęknięć osi kół linowych daje metoda ultradźwiękowa *phased array*. W technice tej stosowane są głowice wieloprzetwornikowe (mozaikowe) sterowane fazowo współpracujące z wielokanałowymi defektoskopami. Jeżeli podczas badań wykonanych standardowym defektoskopem stwierdzi się podejrzenie występowania pęknięć eksploatacyjnych, uzyskane wyniki można zweryfikować właśnie za pomocą techniki *phased array*.

Technika ta w stosunku do metody konwencjonalnej ma przewagę polegającą na tym, że dysponując tylko jedną głowicą, poprzez pobudzenie w odpowiednim czasie poszczególnych przetworników można kształtować wiązkę fali ultradźwiękowej (zmieniać kąty wprowadzenia wiązki oraz ją ogniskować). Dzięki temu można dobrać optymalne kąty wprowadzenia wiązki w stosunku do wykrytej nieciągłości (np. 18°). Podczas badań standardowym defektoskopem musielibyśmy dysponować kilkoma głowicami i wieloma podkładkami kątowymi o różnych nietypowych wartościach kątów. Zastosowanie techniki *phased array* w przypadku badania osi i wałów:

- zwiększa skuteczność badania umożliwia wykrycie pęknięć eksploatacyjnych w początkowej fazie ich powstawania (skanowanie w pełnym zakresie kątów użytecznych, a nie tylko kilkoma skanami, tak jak ma to miejsce w przypadku zwykłego badania UT),
- umożliwia skrócenie czasu badania ze względu na mniejszą ilość stosowanych głowic (ustawień defektoskopu),
- ułatwia interpretację wyników (łatwa zmiana kątów wprowadzenia wiązki – można określić, przy jakim kącie mamy największy sygnał od ewentualnego pęknięcia, przedstawienie wskazania np. na S-skanie) (rys. 6).





Rys. 5. Przykład osi kół czterolinowych



Rys. 6. Zobrazowanie od pęknięcia zmęczeniowego w osi koła jednolinowego uzyskane w technice phased array (głowica B2SPA16 – 16-elementowa 2 MHz, ±30°; maksymalne wskazanie od pęknięcia uzyskano dla kąta wprowadzenia wiązki 14°)

7. WYKRYWANE NIEPRAWIDŁOWOŚCI W OSIACH KÓŁ LINOWYCH

Podczas badań osi kół linowych stwierdza się występowanie wielu nieprawidłowości w stanie technicznym samych osi, węzłów łożyskowych i połączeń piast kół i osi, obniżających trwałość eksploatacyjną osi bądź wręcz wykluczając ich eksploatację.

Metodą ultradźwiękową są wykrywane następujące wady:

- Pęknięcia zmęczeniowe. Zazwyczaj są one spowodowane nieprawidłowym wykonaniem osi, tzn. zbyt małymi promieniami przejścia pomiędzy kolejnymi odsadzeniami, co przyczynia się do wystąpienia efektu działania karbu w obszarach krytycznych osi, bądź zbyt dużym zestopniowaniem średnic prowadzącym do nadmiernego spiętrzenia naprężeń w tych obszarach. Dotyczy to głównie osi w konstrukcjach dwulinowych (rys. 6 i 7). Czasem inicjatorem pęknięć zmęczeniowych są wżery korozyjne występujące często na styku oś – piasta koła.
- Zbyt duża wadliwość wewnętrzna (tzn. zbyt duża wielkość i nasilenie wad pochodzenia hutniczego) w obszarach niebezpiecznych. Dotyczy to głównie osi starych wyciągów szybowych. Wady te nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla bezpiecznej eksploatacji osi, ale w pewnych sprzyjających okolicznościach (spiętrzenie naprężeń w tych obszarach w wyniku przeciążeń bądź stanów awaryjnych urządzenia wyciągowego) mogą być przyczyną powstawania pęknięć.

Nieprawidłowości stwierdzane podczas badania wizualnego w przypadku osi z łożyskami tocznymi dotyczą raczej samych łożysk i połączenia osi z piastą koła.

Nieprawidłowości dotyczące osi z łożyskami ślizgowymi:

- ostre, głębokie (do ok. 2 mm) obwodowe wgłębienia spowodowane nadmiernym zużyciem panewki dolnej, co skutkuje osiadaniem osi i tarciem jej o obudowę łożyska (rys. 8),
- rysy obwodowe na powierzchni ślizgowej czopów spowodowane dostawaniem się zanieczyszczeń do oleju (rys. 8),
- plamy korozyjne i przytarcia na powierzchni ślizgowej czopów spowodowane nieprawidłowym smarowaniem,
- łagodne, płytkie, obwodowe wytarcia spowodowane uszczelnieniem filcowym korpusów łożysk,
- luźne pierścienie smarujące.

Osie z pęknięciami zmęczeniowymi należy bezwzględnie wymienić na nowe w technicznie możliwie najkrótszym terminie, a do czasu wymiany propagacja pęknięć monitorowana jest badaniami ultradźwiękowymi prowadzonymi w odpowiednio krótkich okresach czasowych. Pozostałe nieprawidłowości wymagają niezwłocznego usunięcia przyczyn ich powstania, a uszkodzenia osi kontrolowane są podczas kolejnych nieniszczących badań okresowych.



Rys. 7. Pęknięcia zmęczeniowe wykryte podczas badania ultradźwiękowego osi koła jednolinowego (na drugim odsadzeniu) – zobrazowanie z wykorzystaniem metody magnetyczno-proszkowej (MT)



Rys. 8. Rysy obwodowe na powierzchni czopa łożyskowego osi

8. PODSUMOWANIE

Prawidłowa ocena stanu technicznego osi podczas eksploatacji – pomimo utrudnień i ograniczeń w badaniu osi kół linowych – jest możliwa dzięki odpowiedniemu wyposażeniu badawczemu oraz certyfikowanemu personelowi z wieloletnim doświadczeniem w badaniach ultradźwiękowych.

Wczesne wykrycie pęknięć eksploatacyjnych daje użytkownikowi odpowiedni zapas czasu potrzebny do przygotowania się na wymianę osi przy jednoczesnym zapewnieniu bezpiecznej eksploatacji.

Okresowe badania nieniszczące osi kół linowych z jednej strony zapobiegają powstawaniu stanów awaryjnych, z drugiej zaś przyczyniają się do przedłużenia okresu bezpiecznej eksploatacji kół linowych górniczych wyciągów szybowych.

Literatura

- [1] Pawłowski Z.: Badania nieniszczące. Metody ultradźwiękowe. PWN, Warszawa 1976.
- [2] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. z późniejszymi zmianami w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych: Załącznik nr 4. Dz.U. 2017, poz. 1118.

- [3] Metodyka postępowania rzeczoznawcy ds. badań nieniszczących materiałów i urządzeń górniczych. Instrukcja nr DM/MRS/40. CBiDGP wyd. VII, 25.09.2019 [praca niepublikowana].
- [4] Wykonywanie badań defektoskopowych osi kół linowych i odciskowych, instrukcja techniczna nr DM/MRS/40-2. CBiDGP wyd. VII, 25.09.2019 [praca niepublikowana].
- [5] PN-G-46203:1996. Górnicze wyciągi szybowe. Koła linowe kierujące. Wymagania i badania. 24.10.1996.
- [6] PN-EN 10228-3:2016-07. Badania nieniszczące odkuwek stalowych. Część 3: Badanie ultradźwiękowe odkuwek ze stali ferrytycznych lub martenzytycznych. 22.07.2016.
- [7] Antoniak J.: Maszyny górnicze. Część III. Transport kopalniany. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1980.
- [8] Skorupa A., Jędrzejczak Z., Hyrnik E., Kucowicz E.: Badania ultradźwiękowe elementów urządzeń wyciągowych. Zeszyty Naukowe AGH, 1273. Mechanika, 21, Kraków 1989: 51–60.

mgr inż. SŁAWOMIR STRASZAK mgr inż. ARTUR WIKTOR Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego w Lędzinach Ośrodek Rzeczoznawstwa i Pomiarów w Mysłowicach Ośrodek Rzeczoznawstwa i Dozoru Urządzeń Górniczych

{a.wiktor; s.straszak}@cbidgp.pl