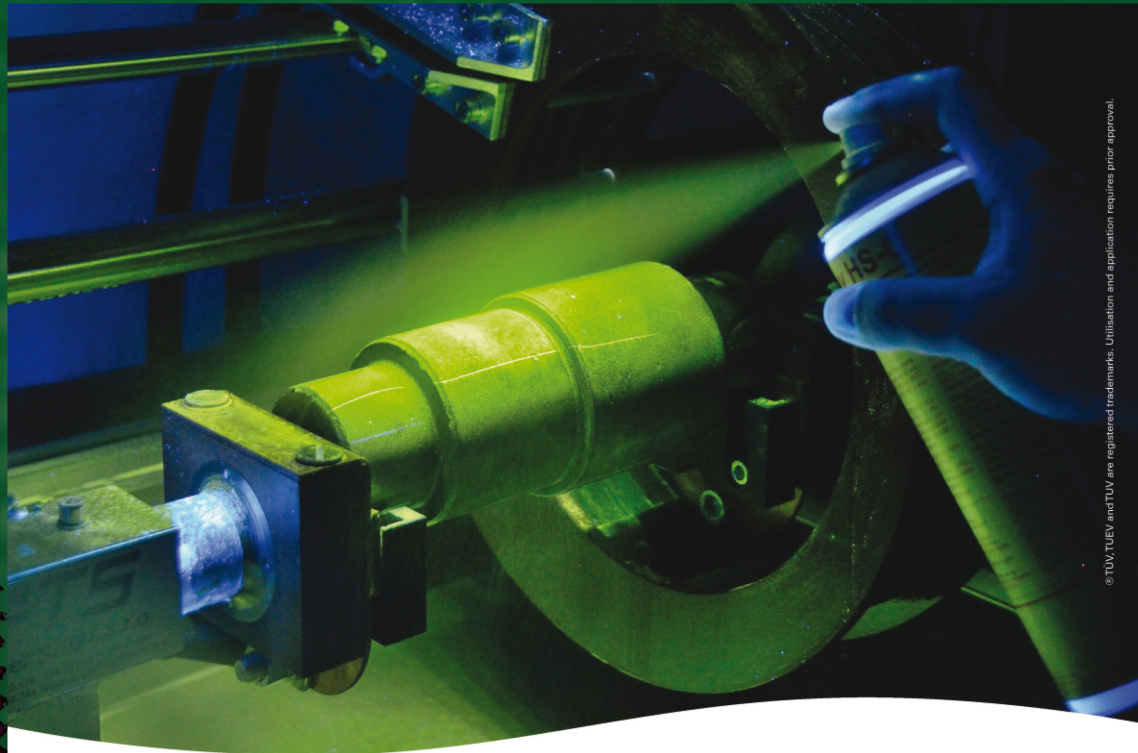


Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2020 i Diagnostyka

Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics



© TÜV, TÜV and TÜV are registered trademarks. Utilisation and application requires prior approval.

Szkolenia, egzaminy
i certyfikacja personelu NDT



AC 195



NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.



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-CA REDAKTORA NACZELNEGO DS. NAUKOWYCH /

DEPUTE EDITOR-IN-CHIEF OF SCIENTIFIC AFFAIRS

Jerzy Nowacki

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF

Adam Sajek

Ryszard Pakos

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY

Dr Sławomir Mackiewicz, Dr Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH

Mgr Bogdan Piekarczyk, Mgr Marta Wojas

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ

/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH

Dr Grzegorz Jezierski, Mgr Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ

/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH

Dr Krzysztof Dragan, Mgr Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS

Dr 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, Greece*

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. Leonard Runkiewicz, *Instytut Techniki Budowlanej, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wrocławska, Polska*

Prof. Valentyn R. Skalskyy, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Prof. Andrzej Szymański, *Politechnika Śląska, 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 Vértessy, *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 1-4/2020

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 5

SPIS TREŚCI

Redakcja BNiD	
Słowo wstępne	2
Dariusz WOJDAŁA	
48. Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących	5
Gerd DOBMANN	
Quo Vadis NDT? – A Forecast of the Future*	6
Tadeusz STEPINSKI	
Badanie kotew kopalnianych przy użyciu fal prowadzonych*	18
Bogusław ŁADECKI	
Przedwczesne uszkodzenie zmęczeniowe wału ze stali nierdzewnej gatunku X46Cr13*	28
Przemysław ŁOPATO, Michał HERBKO	
Badanie wpływu mechanicznego odkształcenia metapowierzchni bazującej na komplementarnym rezonatorze pierścieniowym na jej właściwości rezonansowe w zakresie mikrofalowym i terahercowym*	32
Bogusław ŁADECKI	
Badania diagnostyczne przyczyn awarii wytłaczarki przemysłowej do tworzyw sztucznych $\varnothing 90^*$	38
Informacje dla Autorów i Czytelników	42

* Artykuł recenzowany

REKLAMY NA OKŁADCE

TÜV Rheinland	1
TÜV Rheinland	43

REKLAMY W NUMERZE

49. KKBN	4
----------------	---

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiD



Tadeusz Stepinski*

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie

Badanie kotew kopalnianych przy użyciu fal prowadzonych

Monitoring of Rock-bolts Using Ultrasonic Guided Waves

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodę badania kotew górniczych przy użyciu fal ultradźwiękowych. Na wstępie zaprezentowano kilka specjalistycznych czujników i instrumentów, które można wykorzystać do monitorowania kotew w czasie ich eksploatacji. Artykuł koncentruje się na zastosowaniu do badań prowadzonych fal ultradźwiękowych zdolnych do rozprzestrzeniania się na duże odległości w prętach. Fale te są jednak dyspersyjne i multimodalne, co oznacza, że wiele postaci falowych może propagować jednocześnie z różnymi prędkościami zależnymi od częstotliwości. Zastosowanie ultradźwiękowych fal do kotew NDE omówione szczegółowo na przykładzie instrumentu RBT (Rock-Bolt Tester), który jest cyfrowym instrumentem ultradźwiękowym pracującym w układzie puls-echo, wyposażonym w specjalnie skonstruowaną głowicę ultradźwiękową, zdolną do generowania fal sprężystych o wysokiej energii i niskiej częstotliwości (poniżej 100kHz). Głowica jest również zdolna do odbierania słabych echa odbitych od końca kotwy i od nieciągłości w zaprawie ją otaczającej. Echa odbierane przez sondę są wzmacniane, filtrowane i prezentowane graficznie w postaci A-skanów. Na zakończenie, dla ilustracji działania instrumentu RBT przedstawiono wyniki jego weryfikacji eksperymentalnej.

Słowa kluczowe: Badania nieniszczące; techniki ultradźwiękowe; fale prowadzone; kotwy górnicze

ABSTRACT

In this paper we are presenting principles of rock-bolts NDE using ultrasonic guided waves. A number of specialized sensors and instruments is presented that can be used for monitoring bolts status. The paper is focused on the application of ultrasonic guided waves (GW) able to propagate over long distances in bars. GWs are, however, dispersive and multimodal, which means that many wave modes can propagate simultaneously with different frequency dependent velocities. Application of ultrasonic guided waves for rock-bolts NDE is presented in some detail using for illustration the new designed instrument rock-bolt tester (RBT). RBT is a pulse-echo digital ultrasound instrument provided with an application tailored ultrasound probe that transmits high-energy, low frequency (below 100kHz) guided waves. The probe is also capable of receiving weak echoes reflected from the bolt-end and from some discontinuities in the surrounding grout. The echoes received by the probe are amplified, filtered and presented in the form of A-scans. Experimental results are presented that illustrate the performance of the RBT instrument.

Keywords: NDE; ultrasonic guided waves; rock-bolts

1. Wstęp

Kiedy w kopalni, tunelu lub innym skalnym obiekcie inżynierskim drążony jest korytarz, jednym z kluczowych zagadnień jest związanie luźnych bloków skalnych, aby zapewnić bezpieczeństwo pracy i zminimalizować ryzyko zakłóceń podczas pracy. Najważniejszą czynnością po oczyszczeniu powierzchni skały jest wzmocnienie stropu i ścian. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest instalacja kotew (prętów kotwiących) w specjalnie wykonanych otworach i wykończenie powierzchni przez nałożenie betonu natryskowego. Kotwy skalne są powszechnie stosowane do wzmocnienia stropu i ścian tuneli lub innych obiektów skalnych w celu zwiększenia bezpieczeństwa ludzi, a także zapewnienia trwałości wykonanego tunelu [1,2]. Kotwy to stalowe (lub kompozytowe) pręty różnych typów, które są zakotwiczone w głębokich otworach w skale i/lub często wklejone za pomocą specjalnego środka wiążącego (cementu lub żywicy epoksydowej), jak pokazano na Rys. 1a. Istnieje wiele rodzajów kotew skalnych produkowanych fabrycznie; zazwyczaj mają one postać kilkumetrowych prętów stalowych o średnicy w zakresie jednego cala (Rys. 1b).

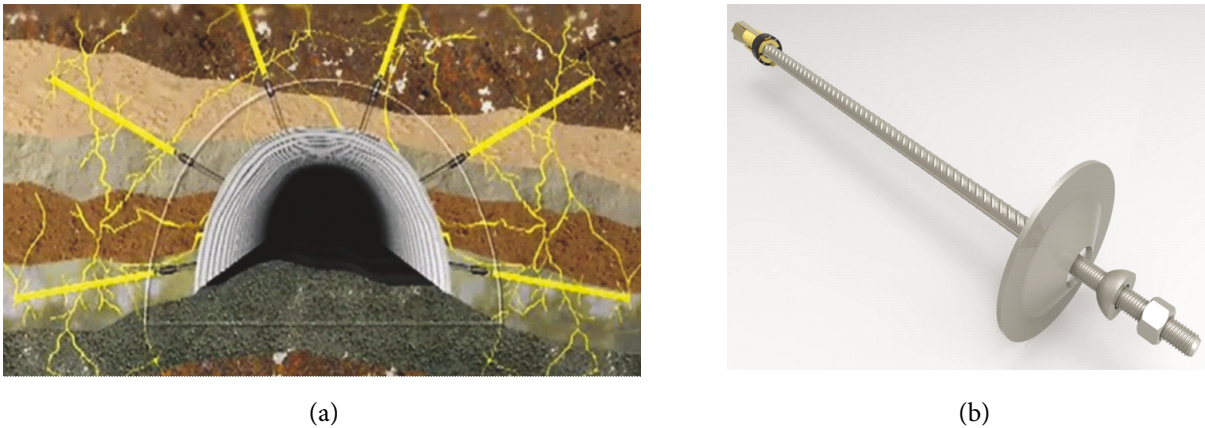
*Autor korespondencyjny. E-mail: tstepin@agh.edu.pl

Badania nieniszczące (NDE) kotw, zarówno zaraz po zainstalowaniu, jak i monitorowanie ich stanu technicznego (SHM) podczas pracy, jest niezwykle ważnym środkiem mającym na celu zapewnienie bezpieczeństwa personelu pracującego w obiekcie skalnym, a także trwałego zbrojenia skały. Najbardziej naturalną metodą badawczą kotew jest próba wyrywania, która niestety, jest techniką czasochłonną i destrukcyjną, która jest zdolną praktycznie wykryć jedynie bardzo źle zainstalowane kotwy.

Techniki do kontroli i monitorowania integralności kotew były przedmiotem wielu prac badawczych [3-9]. W artykule przedstawiamy krótki przegląd technik nieniszczących, które można zastosować do kontroli i monitorowania kotew kopalnianych.

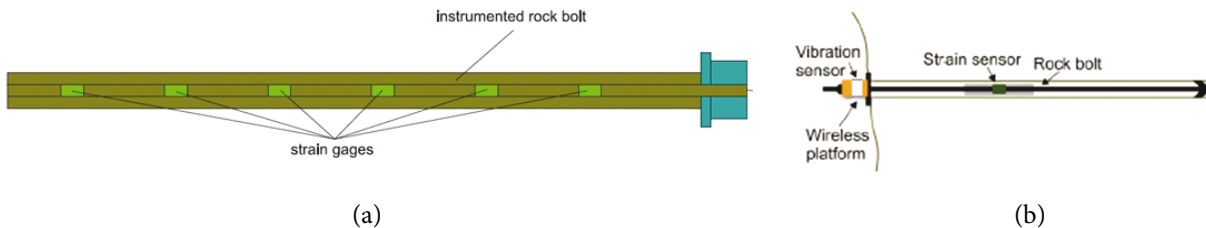
2. Metody monitorowania integralności kotew górniczych

Inspekcja kotew jest zwykle przeprowadzana metodą statystyczną na serii, wstępnie wybranych, prętów zainstalowanych w skalnej ścianie. Badania można wykonać bezpośrednio po zainstalowaniu kotew lub po pewnym okresie ich eksploatacji, aby zdecydować, czy kotwy wytrzymają projektowane obciążenia. Natomiast monitorowanie stanu (SHM) ma bardziej zaawansowaną



Rys. 1. Tunel w skale wzmocniony kotwami (a). Kotwa stalowa z mechaniczną kotwicą, którą umieszcza się na dnie otworu wydrążonego w skale. Po wtłoczeniu kotwy w otwór wypełniony środkiem wiążącym nakłada się podkładkę i dociska się ją do ściany specjalną nakrętką.

Fig. 1. Tunnel in a rock reinforced by rockbolts (a). Typical rockbolt with mechanical anchor (b).



Rys. 2. Przykładowe rozwiązania kotew pomiarowych. Kotwa wyposażona w tensometry do pomiaru naprężeń (a). Inteligentna kotwa z tensometrem i czujnikiem wibracji i szwedzkiej f-my ThingWave AB (b).

Fig. 2. Concept of instrumented rockbolt (a). Instrumented rockbolt provided with strain gauges and vibration sensor designed by the Swedish company ThingWave AB (b).

funkcję – jest to test wykonywany w celu znalezienia czy aktualne obciążenie kotwy nadal mieści się w projektowanym zakresie obciążenia. Do długoterminowego monitorowania, powinny być użyte czujniki na stałe zainstalowane na szeregu kotew znajdujących się w strefach krytycznych. Do długoterminowego monitorowania, powinny być użyte czujniki na stałe zainstalowane na szeregu kotew znajdujących się w strefach krytycznych.

Ciągle monitorowanie kotew można wykonać za pomocą specjalnie wykonanych prętów pomiarowych wyposażonych w specjalne czujniki, które są zamontowane na stałe i umieszczone podczas instalacji takiej kotwy, lub też są zintegrowane z częścią zewnętrzną kotwy (nakrętki lub płyty czołowej) [7]. Kotwy pomiarowe są oprzyrządowane za pomocą tensometrów, które służą do monitorowania naprężenia osiowego, a nawet rozkładu tych naprężeń na całej długości kotwy (Rys.2a). Niezwykle zaawansowaną konstrukcją kotwy pomiarowej, zaproponowaną przez szwedzką firmę.

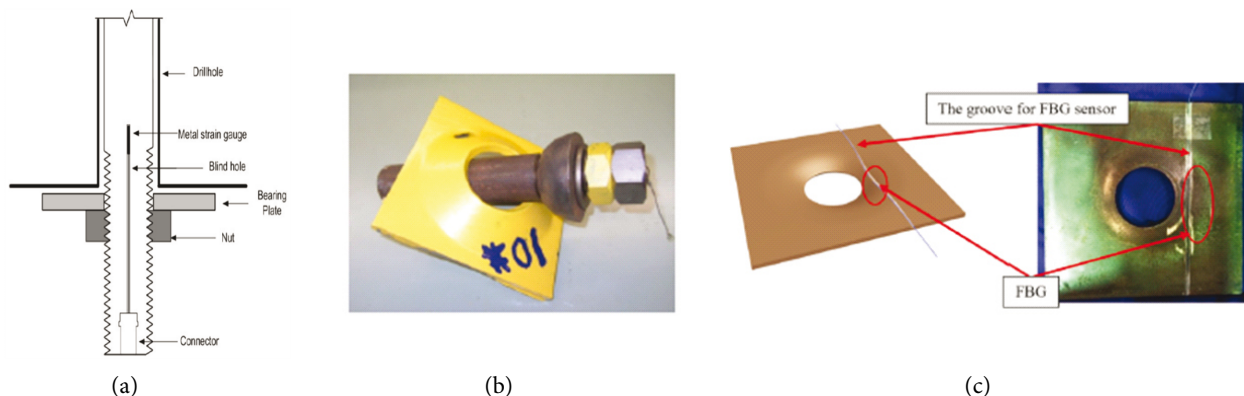
ThingWave AB pokazano na Rys.2b. Firma przedstawiła koncepcję „inteligentnej kotwy”, która może monitorować nie tylko naprężenia (siłę), ale także wibracje i przesyłać mierzone dane do sieci bezprzewodowej.

W niektórych rozwiązaniach, wibracyjny miernik naprężenia w postaci wibrującego drutu, jest zintegrowany na niewielkim odcinku ze standardową kotwą lub prętem zbrojeniowym, (Rys.3a). Tak zainstrumentowana kotwa powinna być zainstalowana w taki sposób w skale, aby

zapewnić, że odcinek pomiarowy z tensometrem znajduje się obciążonej w strefie kotwy.

Wskazania tensometru mogą być odczytywane przy pomocy przenośnego instrumentu, który podłącza się do gwintowanej końcówki kotwy (Rys.3a). Prostszy rozwiązaniem jest umieszczenie czujnika obciążenia pomiędzy podkładką a nakrętką kotwy, jak pokazano na Rys.3b. Jest to ekonomiczne rozwiązanie, które umożliwia montaż takich czujników na wielu kotwach. Należy jednak zauważyć, że zewnętrzne czujniki tensometryczne, które są w stanie zmierzyć obciążenie zewnętrznej części kotwy, są rozwiązaniem skutecznym praktycznie tylko w przypadku kotew niewklejanych.

Większość produkowanych dziś kotew jest wykonana ze stali, ale do specjalnych zastosowań produkowane są również kotwy wykonane z materiałów kompozytowych, takich jak polimer wzmocniony włóknem szklanym (GFRP) i polimer wzmocniony włóknem węglowym (CFRP). Osadzenie czujników światłowodowych wewnątrz materiałów kompozytowych jest bardzo skuteczne w przenoszeniu obciążenia i chroni delikatną warstwę optyczną przed uszkodzeniami mechanicznymi. Kotwy GFRP wyposażone w czujniki światłowodowe FBG zostały zainstalowane w tunelu Sargans w Szwajcarii w celu długoterminowego monitorowania obciążenia [7]. Czujniki FBG do pomiaru obciążenia kotew można również zainstalować w podkładce prostokątnej, jak pokazano na Rys.3c.



Rys. 3. Przykładowe rozwiązania stosowane do monitorowania kotew. Wewnętrzny wibrujący tensometr drutowy (a). Tensometr zewnętrzny pod nakrętką kotwy (b). Pomiar przy pomocy światłowodu zintegrowanego z podkładką kotwy (c).

Fig. 3. Sensors used for rockbolt monitoring: force cell mounted inside the bolt (a), force cell under nut (b), FBG sensor (c).

3. Nieniszczące metody testowania kotew górniczych

Inspekcja kotew jest zwykle przeprowadzana metodą statystyczną na serii, wstępnie wybranych, prętów zainstalowanych w skalnej ścianie, przez wykwalifikowanego operatora korzystającego ze specjalistycznego instrumentu. Celem badania, które można wykonać bezpośrednio po zainstalowaniu kotwy lub po pewnym okresie ich eksploatacji, jest sprawdzenie integralności kotwy, aby zdecydować, czy wytrzymają one projektowane obciążenia.

Najbardziej obiecującą techniką nieniszczącą wydaje się zastosowanie fal sprężystych propagujących w pręcie osadzonym w środku wiążącym. Drgania o bardzo niskiej częstotliwości zastosowano w instrumencie GRANIT opracowanym w University of Aberdeen, GB [5]. Fale sprężyste wywołane impulsem spowodowanym przez uderzenie specjalnym młotkiem modalnym są wykrywane przez akcelerometr umieszczony na urządzeniu. Stan kotwy można określić za pomocą sieci neuronowej, która uprzednio została specjalnie przetrenowana dla interpretacji sygnałów akcelerometru (analizy modalnej). Jednakże to podejście, zaproponowane dla interpretacji sygnału, wydaje się być główną wadą instrumentu GRANIT – można go było użyć tylko dla prętów, które zostały w pełni scharakteryzowane wcześniej [3,5]. GRANIT nie jest już dostępny, ale niskoczęstotliwościowe fale elastyczne są również wykorzystywane w przyrządach testowych opracowanych w Australii przez GEOHART Consultants (www.geohart.com.au) i ROKTEL (www.roktelgroup.com). Wszystkie te instrumenty wykonują rodzaj uproszczonej analizy modalnej prętów w paśmie niskich częstotliwości (kilka kHz), co wydaje się rozsądne do wykrycia większych wad montażowych, np. dużych pustek w środku wiążącym i/lub rozległej korozji.

Fale sprężyste w zakresie niskich częstotliwości są związane z dużymi długościami fal w pręcie, a zatem są nieodpowiednie do wykrywania mniejszych defektów w kotwach. Fale ultradźwiękowe w zakresie dziesiątków kHz propagują w stali postaci fal o krótszych długościach i są w stanie, przynajmniej teoretycznie, wykrywać, a nawet lokalizować mniejsze wady w pręcie i w otaczającej go

zaprawie, np. miejscową korozję lub małe kieszonki powietrzne.

Pierwszy dostępny na rynku przyrząd wykorzystujący fale ultradźwiękowe, Boltometr, został opracowany w Szwecji w 1970 roku [3,10]. Boltometr był wyposażony w specjalną głowicę piezoelektryczną, zdolną do wytwarzania fal podłużnych oraz fal quasi-skrętnych w pręcie kotwy oraz odbioru słabych echa odbitych od nieciągłości w samym pręcie oraz w zaprawie na jego powierzchni. Niestety, Boltometr, mimo że jego użyteczność została praktycznie wykazana (głównie w Skandynawii), nie jest już dostępny w komercyjnie a jego konstrukcja jest już mocno przestarzała. Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na tego typu instrument, szwedzka firma Geosigma AB opracowała nowoczesną ulepszoną wersję Boltometru (specjalnie zaprojektowany przyrząd oparty na PC – Rock-Bolt Tester (RBT) [11-13].

Instrument posiada specjalnie skonstruowaną głowicę ultradźwiękową z nadajnikiem wzbudzonym przez długie ciągi szerokopasmowych impulsów ultradźwiękowych o częstotliwości poniżej 100kHz, zdolną do generowania fal sprężystych o wysokiej energii. Jego odbiornik jest zdolny odebrać słabe echa powstałe na skutek nieciągłości na powierzchni kotwy, a także echo odbite od zakończenia kotwy, które propagowały wstecz w kotwie wklejonej o długości do 4 metrów. W instrumencie RBT zastosowano metodę puls-echo, jako najbardziej odpowiednią dla zastosowań, w których pręty są dostępne tylko z jednej strony.

3.1 Ultradźwiękowe fale prowadzone w prętach

Kiedy fale ultradźwiękowe propagują w stalowej kotwie wklejonej w skałę, następuje wyciek energii fal sprężystych ze stalowego pręta kotwy do otaczających warstw, czyli najpierw do środka wiążącego i dalej do masy skalnej. Całkowita ilość wyciekającej energii jest spowodowana dwoma różnymi mechanizmami: efektem rozproszenia geometrycznego i strat w materiale kotwy oraz z rozproszenia energii w zaprawie i otaczającym materiale skalnym. W efekcie tych czynników można zaobserwować tłumienie amplitudy fal, a więc i odbitych echa, która może sięgać kilkudziesięciu dB/m.

W sytuacjach praktycznych, dla kotew wklejanych, czynnikiem dominującym są straty wywołane wyciekaniem energii do otaczających mediów. Ilość rozproszonej energii jest związana z różnicą impedancji akustycznej pręta stalowego i otaczającego go środka wiążącego, dla przykładu, obserwowane tłumienie jest niższe w przypadku żywic epoksydowych niż w przypadku zapraw cementowych. Tłumienie fal w kotwach zakotwiczonych niewklejonych jest relatywnie niskie i fale prowadzone mogą tam propagować na odcinkach wielu metrów. Jeśli długość kotwy jest krótsza od zasięgu propagacji fali pojawiają się echa wielokrotne, które mogą powodować rezonanse modalne dla częstotliwości określonej prędkością fali (prędkością propagacji energii).

W jednorodnym pręcie ze sztywnego materiału o stałym okrągłym przekroju i długości L , która jest znacznie większa niż jego średnica, mogą propagować fale w trzech niezależnych postaciach, o długościach, które są dużo większe niż średnica pręta d . Każda propagująca postać ma określoną strukturę falową i zależną od częstotliwości prędkość [3, 11, 12]. Wyróżniamy trzy główne typy postaci fal, które mogą się rozprzestrzeniać w długich cienkich prętach: postać podłużna (L), postać poprzeczna (ścinająca) (F) oraz postać skrętna (T). W dziedzinie częstotliwości fale te mają charakter multimodalny i dyspersyjny i charakteryzują się dwoma różnymi prędkościami: prędkością fazową i prędkością grupową. Znaczący to, że faza fali rozchodzi się z inną prędkością niż obwiednia fali (energia fali). W pasmach wyższych częstotliwości energia ultradźwiękowa może przemieszczać się w wielu różnych postaciach, które propagują jednocześnie. Ilustrują to Rys. 4a i 4b, które pokazują symulowane wykresy prędkości fazowych i grupowych określone w funkcji częstotliwości dla nieutwierdzonego pręta z wolnymi końcami w zakresie częstotliwości 0-100 kHz. Przedstawione tu wyniki uzyskano przy użyciu

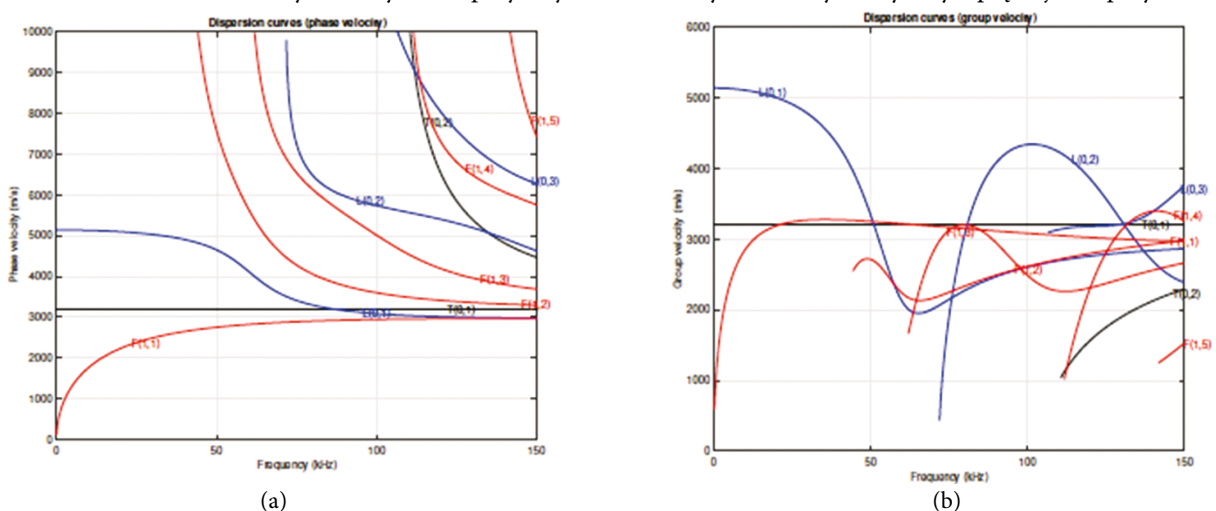
pakietu oprogramowania PCDISP, opartego na teorii Pochhammera-Chree (PC) i napisanego w środowisku Matlab [11-13].

Na Rys. 4 widać, że prędkość grupowa pierwszej postaci podłużnej $L(0,1)$, która zaczyna się od zera wynosi 5200 m/s i jest znacznie wyższa niż prędkości innych postaci w zakresie niskich częstotliwości 0-40 kHz. Prędkości grupowe i fazowe postaci poprzecznej $T(0,1)$ są stałe i równe prędkości fali poprzecznej w stali (3200 m/s). Prędkość postaci ścinającej $F(1,1)$ ulega znacznym zmianom dla niskich częstotliwości (w paśmie poniżej 40 kHz) aby ustabilizować się wokół prędkości fali poprzecznej w paśmie wyższych częstotliwości. Wyższe postacie fal rozpoczynają się przy częstotliwościach wyższych niż 40 kHz i wykazują duże zmiany prędkości, co oznacza, że są bardzo dyspersyjne. Warto zauważyć, że postać poprzeczna $T(0,1)$ ma stałą prędkość, a więc jest niedyspersyjna.

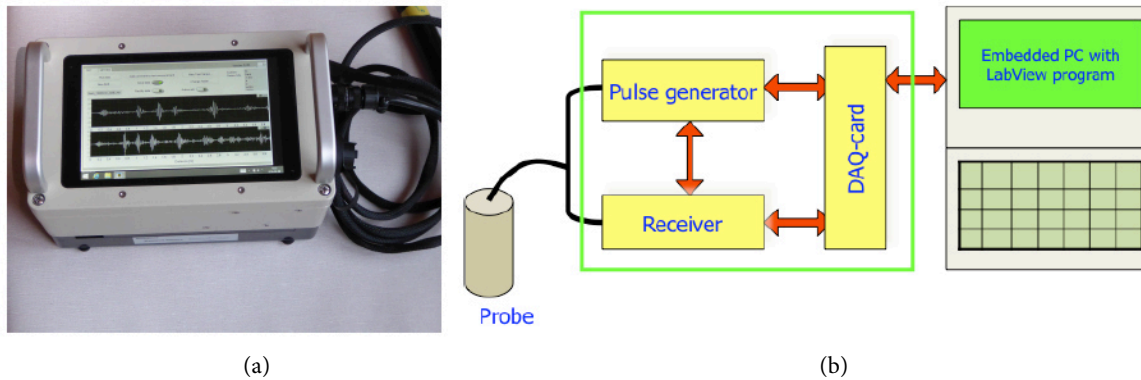
Znaczna dyspersyjność jest wadą w praktycznych zastosowaniach, szczególnie w przypadku krótkich impulsów czasowych, które są często używane w badaniach ultradźwiękowych. Jeżeli pasmo częstotliwości impulsu znajduje się w obszarze silnie dyspersyjnym, jego obwiednia może zostać znacznie zdeformowana, a jego długość zostanie zwiększona, co komplikuje proces wykrywania wad. Ponadto, jeśli wiele postaci propaguje jednocześnie w wybranym paśmie częstotliwości z różnymi prędkościami, analiza czasowa sygnałów staje się jeszcze bardziej skomplikowana.

Dlatego, kiedy należy wybrać odpowiednie pasmo częstotliwości do kontroli kotwy należy uzyskać pełny obraz dyspersyjności oraz energii związanej z różnymi postaciami, które propagują w tym paśmie.

Zasadniczo, prędkości postaci falowych propagujących się w pręcie zależą zarówno od jego średnicy (należy zauważyć, że cylindryczny pręt jest przybliżonym

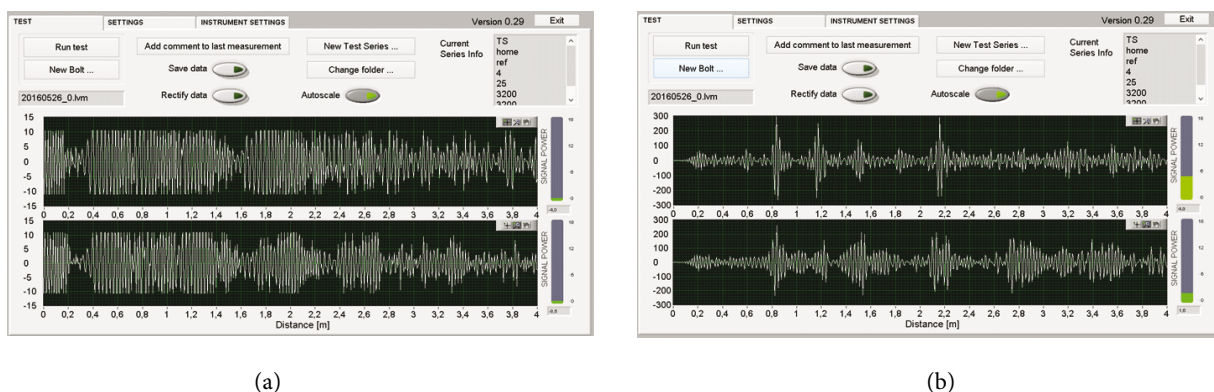


Rys. 4. Przykładowe symulowane prędkości zależne od częstotliwości dla pręta stalowego o średnicy 1 cala: prędkość fazowa (a) i prędkość grupowa (energii) (b). Symbole L, F i T oznaczają odpowiednio: postać podłużną, poprzeczną i skrętną. Liczby w nawiasach wskazują numer postaci liczony wraz ze wzrostem częstotliwości; częstotliwość pierwszej osiowej postaci ścinającej, $F(1,2) - f_s = 44$ kHz.
Fig. 4. Simulated frequency dependent velocities for a steel bar _ 1": phase velocity (a) and group (energy) velocity (b). Symbols L, F and T denote longitudinal, flexural and torsional modes, respectively. Numbers in parentheses indicate mode number counted with increasing frequency.



Rys. 5. Instrument RBT (a) i jego schemat blokowy (b).

Fig. 5. The RBT instrument (a) and its block diagram (b).



(a)

(b)

Rys. 6. Przykładowa prezentacja A-scan na ekranie instrumentu RBT. Bezpośrednio odebrane sygnały (a) i sygnały po filtracji filtrem dopasowanym (b). Kolorowe paski po prawej stronie wykresów wskazują energię odebranego sygnału na wybranym odcinku długości.

Fig. 6. A-scan presentation at RBT's screen. Raw signals received by transducer and amplified (a). Signals after filtered by matched filter (b).

1. Wstęp

Kiedy w kopalni, tunelu lub innym skalnym obiekcie inżynierskim drążony jest korytarz, jednym z kluczowych zagadnień jest związanie luźnych bloków skalnych, aby zapewnić bezpieczeństwo pracy i zminimalizować ryzyko zakłóceń podczas pracy. Najważniejszą czynnością po oczyszczeniu powierzchni skały jest wzmocnienie stropu i ścian. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest instalacja kotew (prętów kotwiących) w specjalnie wykonanych otworach i wykończenie powierzchni przez nałożenie betonu natryskowego. Kotwy skalne są powszechnie stosowane do wzmocnienia stropu i ścian tuneli lub innych obiektów skalnych w celu zwiększenia bezpieczeństwa ludzi, a także zapewnienia trwałości wykonanego tunelu [1,2]. Kotwy to stalowe (lub kompozytowe) pręty różnych typów, które są zakotwiczone w głębokich otworach w skale i/lub często wklejone za pomocą specjalnego środka wiążącego (cementu lub żywicy epoksydowej), jak pokazano na Rys. 1a. Istnieje wiele rodzajów kotew skalnych produkowanych fabrycznie; zazwyczaj mają one postać kilkumetrowych prętów stalowych o średnicy w zakresie jednego cala (Rys. 1b).

Badania nieniszczące (NDE) kotw, zarówno zaraz po zainstalowaniu, jak i monitorowanie ich stanu technicznego (SHM) podczas pracy, jest niezwykle ważnym środkiem

mającym na celu zapewnienie bezpieczeństwa personelu pracującego w obiekcie skalnym, a także trwałego zbrojenia skały. Najbardziej naturalną metodą badawczą kotew jest próba wrywania, która niestety, jest techniką czasochłonną i destrukcyjną, która jest zdolną praktycznie wykryć jedynie bardzo źle zainstalowane kotwy.

Techniki do kontroli i monitorowania integralności kotew były przedmiotem wielu prac badawczych [3-9]. W artykule przedstawiamy krótki przegląd technik nieniszczących, które można zastosować do kontroli i monitorowania kotew kopalnianych.

2. Metody monitorowania integralności kotew górniczych

Inspekcja kotew jest zwykle przeprowadzana metodą statystyczną na serii, wstępnie wybranych, prętów zainstalowanych w skalnej ścianie. Badania można wykonać bezpośrednio po zainstalowaniu kotew lub po pewnym okresie ich eksploatacji, aby zdecydować, czy kotwy wytrzymują projektowane obciążenia. Natomiast monitorowanie stanu (SHM) ma bardziej zaawansowaną funkcję – jest to test wykonywany w celu znalezienia czy aktualne obciążenie kotwy nadal mieści się w projektowanym zakresie obciążenia. Do długoterminowego monitorowania, powinny być użyte czujniki na stałe

zainstalowane na szeregu kotew znajdujących się w strefach krytycznych. Do długoterminowego monitorowania, powinny być użyte czujniki na stałe zainstalowane na szeregu kotew znajdujących się w strefach krytycznych.

Ciągle monitorowanie kotew można wykonać za pomocą specjalnie wykonanych prętów pomiarowych wyposażonych w specjalne czujniki, które są zamontowane na stałe i umieszczone podczas instalacji takiej kotwy, lub też są zintegrowane z częścią zewnętrzną kotwy (nakrętki lub płyty czołowej) [7]. Kotwy pomiarowe są oprzyrządowane za pomocą tensometrów, które służą do monitorowania naprężenia osiowego, a nawet rozkładu tych naprężeń na całej długości kotwy (Rys.2a). Niezwykle zaawansowaną konstrukcję kotwy pomiarowej, zaproponowaną przez szwedzką firmę.

ThingWave AB pokazano na Rys.2b. Firma przedstawiła koncepcję „inteligentnej kotwy”, która może monitorować nie tylko naprężenia (siłę), ale także vibracje i przesyłać mierzone dane do sieci bezprzewodowej.

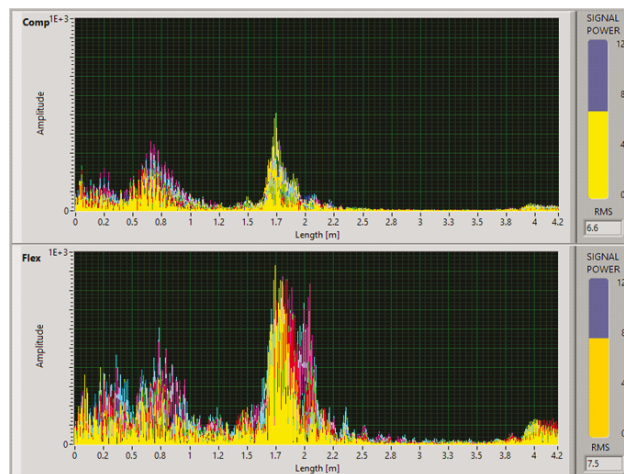
W niektórych rozwiązaniach, wibracyjny miernik naprężenia w postaci wibrującego drutu, jest zintegrowany na niewielkim odcinku ze standardową kotwą lub prętem zbrojeniowym, (Rys.3a). Tak zainstrumentowana kotwa powinna być zainstalowana w taki sposób w skale, aby zapewnić, że odcinek pomiarowy z tensometrem znajduje się obciążonej w strefie kotwy.

Wskazania tensometru mogą być odczytywane przy pomocy przenośnego instrumentu, który podłącza się do gwintowanej końcówki kotwy (Rys.3a). Prostszy rozwiązaniem jest umieszczenie czujnika obciążenia pomiędzy podkładką a nakrętką kotwy, jak pokazano na Rys.3b. Jest to ekonomiczne rozwiązanie, które umożliwia montaż takich czujników na wielu kotwach. Należy jednak zauważyć, że zewnętrzne czujniki tensometryczne, które są w stanie zmierzyć obciążenie zewnętrznej części kotwy, są rozwiązaniem skutecznym praktycznie tylko w przypadku kotew niewklejanych.

Większość produkowanych dziś kotew jest wykonana ze stali, ale do specjalnych zastosowań produkowane są również kotwy wykonane z materiałów kompozytowych, takich jak polimer wzmocniony włóknem szklanym (GFRP) i polimer wzmocniony włóknem węglowym (CFRP). Osadzenie czujników światłowodowych wewnątrz materiałów kompozytowych jest bardzo skuteczne w przenoszeniu obciążenia i chroni delikatną warstwę optyczną przed uszkodzeniami mechanicznymi. Kotwy GFRP wyposażone w czujniki światłowodowe FBG zostały zainstalowane w tunelu Sargans w Szwajcarii w celu długoterminowego monitorowania obciążenia [7]. Czujniki FBG do pomiaru obciążenia kotew można również zainstalować w podkładce prostokątnej, jak pokazano na Rys.3c.

3. Nieniszczące metody testowania kotew górniczych

Inspekcja kotew jest zwykle przeprowadzana metodą statystyczną na serii, wstępnie wybranych, prętów zainstalowanych w skalnej ścianie, przez



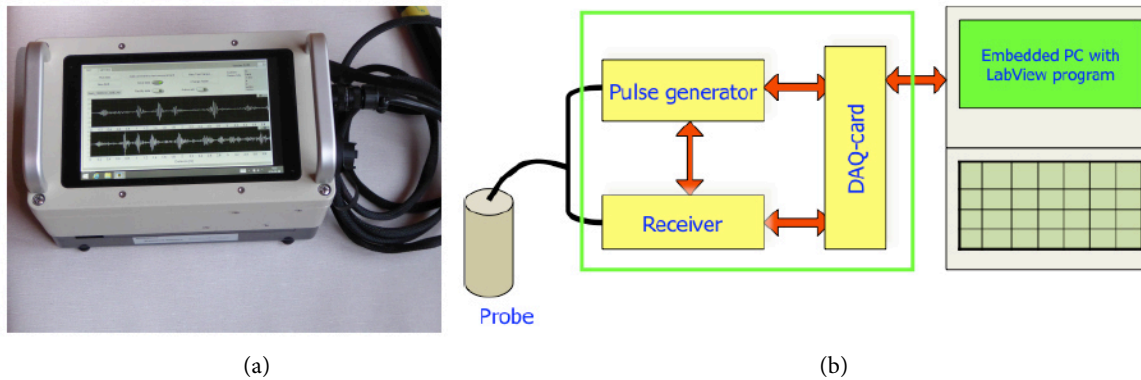
Rys. 7. Prezentacja kilku echogramów uzyskanych z kolejnych pomiarów wykonanych głowicą obracaną w osi kotwy; po prawej stronie wskazania mocy RMS echogramów w dB.

Fig. 7. Presentation of multiple echograms obtained for the transducer turned around its axis. RMS power indication by the strip at the plot's right-hand side.

wykwalifikowanego operatora korzystającego ze specjalistycznego instrumentu. Celem badania, które można wykonać bezpośrednio po zainstalowaniu kotew lub po pewnym okresie ich eksploatacji, jest sprawdzenie integralności kotew, aby zdecydować, czy wytrzymają one projektowane obciążenia.

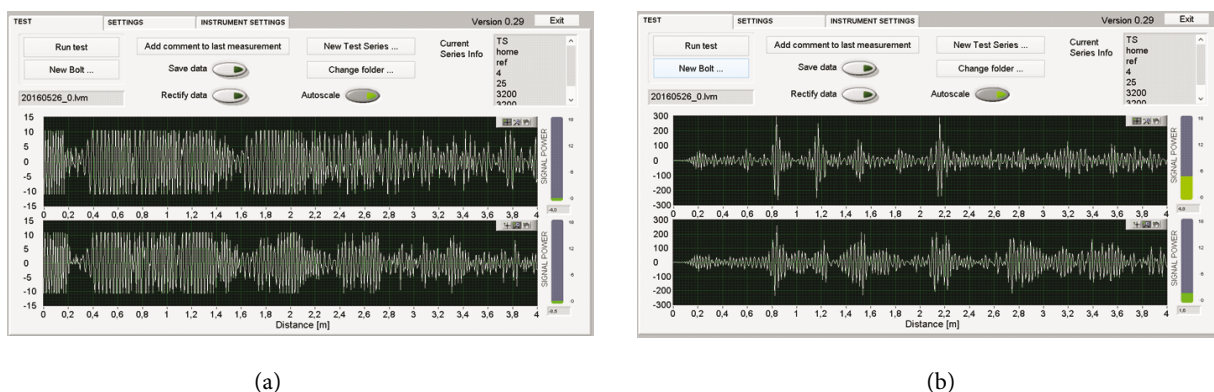
Najbardziej obiecującą techniką nieniszczącą wydaje się zastosowanie fal sprężystych propagujących w pręcie osadzonym w środku wiążącym. Drgania o bardzo niskiej częstotliwości zastosowano w instrumencie GRANIT opracowanym w University of Aberdeen, GB [5]. Fale sprężyste wywołane impulsem spowodowanym przez uderzenie specjalnym młotkiem modalnym są wykrywane przez akcelerometr umieszczony na urządzeniu. Stan kotwy można określić za pomocą sieci neuronowej, która uprzednio została specjalnie przetrenowana dla interpretacji sygnałów akcelerometru (analizy modalnej). Jednakże to podejście, zaproponowane dla interpretacji sygnału, wydaje się być główną wadą instrumentu GRANIT – można go było użyć tylko dla prętów, które zostały w pełni scharakteryzowane wcześniej [3,5]. GRANIT nie jest już dostępny, ale niskoczęstotliwościowe fale elastyczne są również wykorzystywane w przyrządach testowych opracowanych w Australii przez GEOHART Consultants (www.geohart.com.au) i ROKTEL (www.roktelgroup.com). Wszystkie te instrumenty wykonują rodzaj uproszczonej analizy modalnej prętów w paśmie niskich częstotliwości (kilka kHz), co wydaje się rozsądne do wykrycia większych wad montażowych, np. dużych pustek w środku wiążącym i/lub rozległej korozji.

Fale sprężyste w zakresie niskich częstotliwości są związane z dużymi długościami fal w pręcie, a zatem są nieodpowiednie do wykrywania mniejszych defektów w kotwach. Fale ultradźwiękowe w zakresie dziesiątków kHz propagują w stali postaci fal o krótszych długościach i są w



Rys. 5. Instrument RBT (a) i jego schemat blokowy (b).

Fig. 5. The RBT instrument (a) and its block diagram (b).



Rys. 6. Przykładowa prezentacja A-scan na ekranie instrumentu RBT. Bezpośrednio odebrane sygnały (a) i sygnały po filtracji filtrem dopasowanym (b). Kolorowe paski po prawej stronie wykresów wskazują energię odebranego sygnału na wybranym odcinku długości.

Fig. 6. A-scan presentation at RBT's screen. Raw signals received by transducer and amplified (a). Signals after filtered by matched filter (b).

przybliżeniem rzeczywistości) a także właściwości akustycznych otaczającego medium, np. próżni lub skały. Jak już wspomniano wyżej, właściwości akustyczne zaprawy stosowanej do wklejania kotwy determinują ilość energii wyciekającej do zaprawy i dalej do skały, czyli określają tłumienie fal ultradźwiękowych. W praktyce tłumienie fal w kotwie wklejonej może osiągać kilkadziesiąt dB/m, co stanowi podstawowy problem techniczny, którym należy się zająć przy projektowaniu instrumentu pracującego w trybie impuls-echo. Należy pamiętać, że tylko jeden koniec kotwy zainstalowanej w skalnej ścianie jest dostępny, co oznacza, że jedyną możliwą opcją do inspekcji ultradźwiękowej kotew jest metoda impuls-echo z użyciem głowicy nadawczo-odbiorczej.

4. Instrument RBT do badania kotew

Instrument RBT (RockBolt Tester produkcji szwedzkiej firmy GEOSGMA AB) to instrument zbudowany na bazie PC (tabletu), którego główną częścią jest specjalnie zaprojektowany moduł elektroniki analogowej sterowanej cyfrowo przy pomocy karty DAQ firmy National Instruments. Moduł elektroniki analogowej składa się z generatora impulsów oraz odbiornika sygnałów podłączonych do karty DAQ, która służy do komunikacji z PC, a także próbkowania i przetwarzania na postać cyfrową

sygnałów analogowych odbieranych przez głowicę nadawczo odbiorczą, (Rys.5) [11–14]. Głowica zawiera cztery, zintegrowane w obudowie (rękojeści), szerokopasmowe elementy piezoelektryczne, które służą do nadawania i odbioru fal ultradźwiękowych. Elementy nadawcze generują szerokopasmowe postacie fal podłużnych (L) i quasi-skrajnych (F), które są transmitowane do badanej kotwy skalnej. Do badania kotew wykorzystuje się dwie postacie fal, gdyż z doświadczeń uzyskanych z eksploatacji instrumentu Boltometr wynika, że są one wrażliwe na różne wady występujące w otoczeniu kotwy wklejonej i ich jednoczesna analiza ułatwia identyfikację wady.

Tak jak wspomniano wcześniej, RBT generuje sekwencję kilkuset okresów sinusoidy o zmiennej częstotliwości od 20–90kHz (chirp), której długość można dobrać do warunków testu. Zastosowane rozwiązanie, stosowane od dawna w urządzeniach radarowych, pozwala na przesłanie relatywnie wysokiej energii przy stosunkowo niskiej amplitudzie impulsów (30V). Echa odebrane przez elementy odbiorcze głowicy są wzmacniane i poddane filtracji cyfrowym filtrem dopasowanym, który zamienia ciąg impulsów w pojedynczy impuls o wysokiej amplitudzie. Dzięki temu rozwiązaniu uzyskuje się znaczną poprawę stosunku sygnału do szumu w odebranych

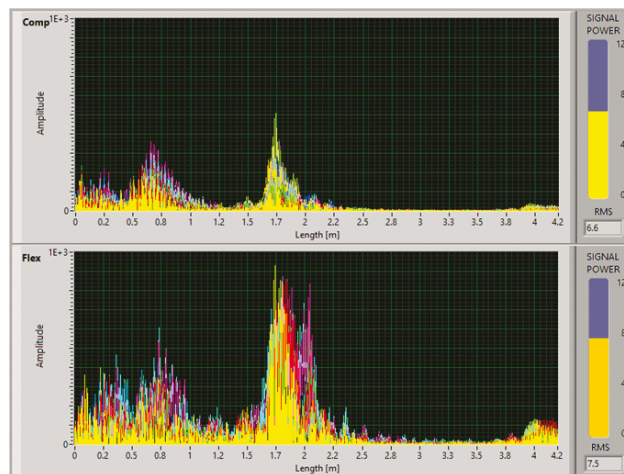
sygnałach. Zasadę działania techniki ilustruje Rys.6, gdzie przedstawiono bezpośrednio odebrane sygnały (6a) i te same sygnały na wyjściu filtra dopasowanego (6b) w funkcji długości pręta. Na ekranie prezentowane są dwa sygnały jeden pod drugim, czyli sygnał uzyskany dla postaci podłużnej L oraz pali quasi-skrętnej F. Jak widać z Rys.6, amplitudy w początkowym odcinku odebranych sygnałów mogą zostać obcięte, gdy przekraczają napięcie zasilania wzmacniaczy co jednak nie wpływa ujemnie na funkcjonowanie filtra dopasowanego, który jest zaimplementowany w postaci cyfrowej przy użyciu PC. Aby uzyskać oba A-scany w czasie testu RBT emituje i odbiera dwa ciągi impulsów jeden po drugim. Emisji i odbioru poszczególnych postaci dokonuje się poprzez odpowiednie połączenie elementów piezoelektrycznych w głowicy (w fazie i w przeciw-fazie).

Skalowanie wykresu jest orientacyjne, gdyż jest dokonywane na podstawie przybliżonej znajomości prędkości obydwu postaci fal, które podobnie jak tłumienie amplitudy impulsów są zależne od wielu czynników wynikających zarówno z rodzaju kotwy jak i typu środka użytego do jej wklejenia. Jeśli na długości kotwy występują znaczne braki zaprawy wypełnione powietrzem lub wodą, prędkość fal na tych odcinkach może ulegać zmianom, a tłumienie sygnałów może znacznie maleć.

Najprostszą metodą kalibracji wskazań instrumentu jest wykonanie testów wstępnych na kotwach referencyjnych o znanej długości i ustalenie prędkości na podstawie położenia echa pochodzącego od końca kotwy. Należy podkreślić, że kalibracja instrumentu RBT powinna być wykonana przed każdym testem przeprowadzanym w nowych warunkach, jeśli wystąpią zmiany w typie skały, zaprawy lub rodzaju kotwy. Jak wspomniano wyżej, w trakcie kalibracji należy dokonać skalowania zarówno skali długości jak i skali amplitud;

Do oceny ilościowej echogramów RBT służy wskaźnik mocy sygnału. Instrument oblicza wartość średniokwadratową sygnału (RMS) w zadanym przedziale długości kotwy i wskazuje cyfrowo jej wartość w dB oraz wizualizuje wysokością i kolorem wstążeczki po prawej stronie wykresów. Wartość mocy RMS jest wartością względną odniesioną do mocy zarejestrowanej dla kotwy referencyjnej wolnej od defektów. Wskaźnik mocy RMS zaimplementowany w RBT jest elastyczny i umożliwia operatorowi wybór przedziału długości, co jest ważne dla wyniku testu. Dla przykładu, operator może zignorować pierwszą część sygnału, która może charakteryzować się dużymi amplitudami, które są nieistotne dla testu, i skupić się na głębokiej części sygnału echa, w której zwykle pojawiają się silne echa, jeśli otwór kotwy nie był właściwie wypełniony cementem.

Z uwagi na niepewność kontaktu akustycznego między głowicą ultradźwiękową a czołem kotwy zaleca się przeprowadzenie kilku pomiarów w różnych położeniach głowicy wykonanych głowicą obracaną w osi kotwy. Po zarejestrowaniu kolejnych pomiarów uzyskuje się wykres przedstawiony na Rys.7, gdzie kolejne echogramy są nałożone na siebie w różnych kolorach.



Rys. 7. Prezentacja kilku echogramów uzyskanych z kolejnych pomiarów wykonanych głowicą obracaną w osi kotwy; po prawej stronie wskazania mocy RMS echogramów w dB.

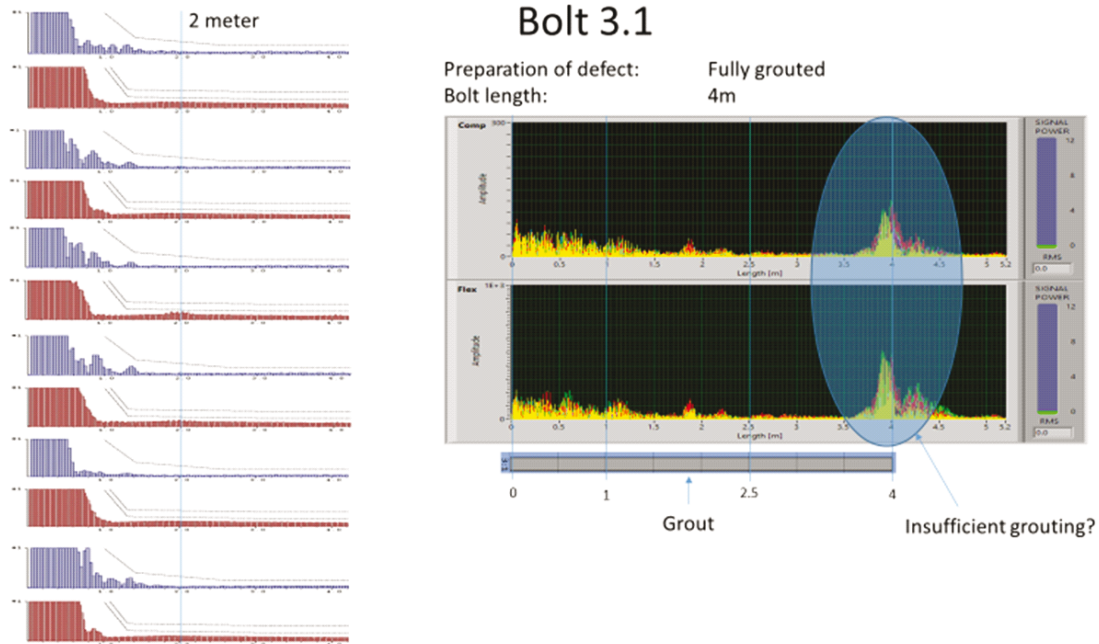
Fig. 7. Presentation of multiple echograms obtained for the transducer turned around its axis. RMS power indication by the strip at the plot's right-hand side.

4.1 Weryfikacja wskazań instrumentu RBT

W celu zweryfikowania poprawności działania oraz poziomu czułości instrumentu przeprowadzono dużą liczbę testów w warunkach naturalnych w kilku wybranych tunelach, gdzie były warunki do instalacji kotew testowych, np. tunele drogowe w Sztokholmie, kopalnia Dannemora, Åspö Hard Rock Laboratory. Dla pełnej kontroli wyników przygotowano kilkadziesiąt specjalnie przygotowanych kotew ze sztucznymi wadami w postaci odcinków o różnej długości otoczonych plastikowymi rurkami uniemożliwiającymi kontakt pręta z cementem. W celu dokładnej weryfikacji, wyniki RBT porównano ze wskazaniami starego instrumentu Boltometr, który ma długoletnią, pozytywną opinię w branży budownictwa tuneli, a także pozytywną ocenę organizacji nadzorujących budowę drogową w Szwecji. Wyniki uzyskane w projekcie zakończonym w ubiegłym roku przedstawiono w raporcie wewnętrznym BEFO (Rock Engineering Research Foundation) [14].

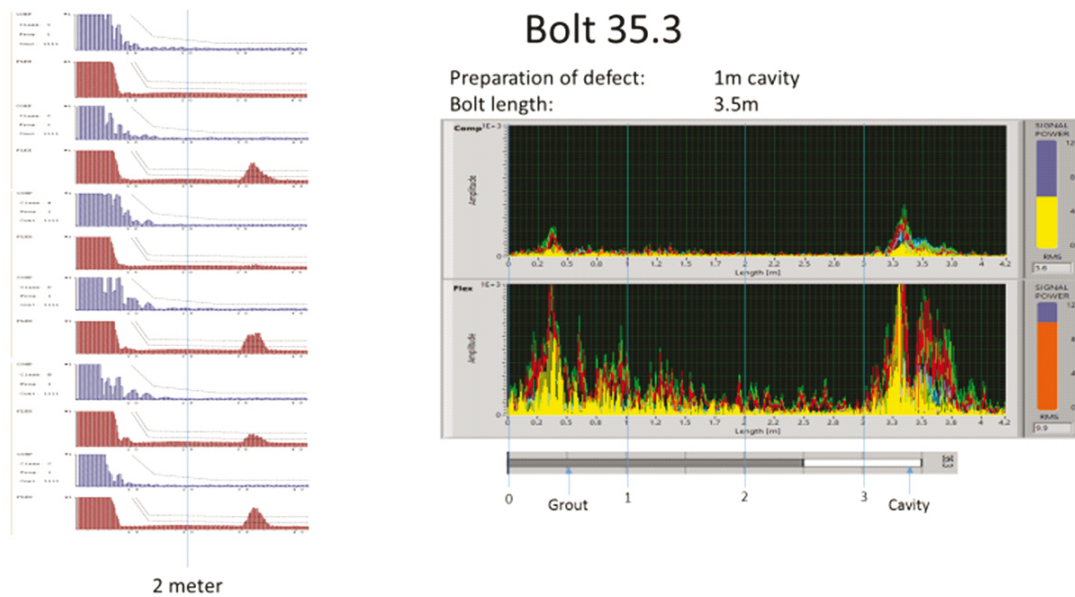
Poniżej, w celu ilustracji, przedstawiamy wybrane wykresy ilustrujące działanie RBT oraz sposób przeprowadzenia testów weryfikacyjnych. Załączone poniżej rysunki przedstawiają echogramy uzyskane w kolejnych próbach wykonanych w różnych położeniach głowic w stosunku do badanej kotwy przy użyciu: instrumentu Boltometr (po lewej stronie) oraz instrumentu RBT i schemat graficzny kotwy (po prawej stronie). Oba przyrządy generowały i odbierały każdorazowo obie postaci fal (L oraz F).

Przykład echogramów prawidłowo wklejonej kotwy o długości 3.5m przedstawionej na Rys.8. charakteryzuje niski poziom sygnałów (zielony krótki pasek w echogramie RBT) oraz niski poziom echa na długości kotwy z wyjątkiem echa od jej końca, które może świadczyć o tym, że końcówka jest odsłonięta (nie ma kontaktu z cementem).



Rys. 8. Sześć echogramów kotwy 3.1 z laboratorium Åspö. Echogramy uzyskane z instrumentu Boltometr (z lewej) oraz instrumentem RBT (z prawej). Schematyczny rysunek kotwy pod spodem echogramu RBT.

Fig. 8. Reference bolt 3.1 at Åspö. Echograms from the Boltometer (left) and from the RBT (right). (6 measurements performed with both instruments).



Rys. 9. Sześć echogramów kotwy 35.3 z kopalni Dannemora. Echogramy uzyskane z instrumentu Boltometr (z lewej) oraz instrumentem RBT (z prawej). Schematyczny rysunek kotwy pod spodem echogramu RBT.

Fig. 9. Bolt 35.3 at Dannemora. Echograms from the Boltometer (left) and from the RBT (right) (six measurements with both instruments).

Zupełnie odmienny rezultat otrzymano dla kotwy 3.5 m (Rys.9), na której końcu umieszczono rurkę osłaniającą o długości 1 m – kolor oraz wysokość pasków na echogramie RBT wskazuje wysoki poziom sygnałów spowodowany obecnością silnych echa na końcu echogramów, poczynając od 3 m. Analogiczne echa są też widoczne we wskazaniach

Boltometru, którego strefa czułości zaczyna się od ponad 1 m (wcześniej występują oscylacje wewnętrzne elementów głowicy)

Wyniki testów weryfikujących działanie RBT, przedstawione w raporcie BEFO [14], wykazały wysoką użyteczność tego instrumentu i jego wysoką zdolność

wykrywania defektów występujących w kotwach wklejanych. Echa pochodzące od końców kotew są wyraźnie widoczne nawet dla kotew nawet o długości 4m, a korelacja echogramów z położeniem sztucznych defektów jest wysoka. Sposób weryfikacji przy użyciu spreparowanych kotew ze sztucznymi wadami jednego typu może budzić wątpliwości, zwłaszcza w środowisku inżynierii górniczej, ale jest on jest szeroko akceptowany jako podstawowa metoda kalibrowania instrumentów używanych do badań nieniszczących.

5. Podsumowanie

W obiektach górniczych i innych obiektach podziemnych wykonanych metodą strzałową, gdzie występują wysokie naprężenia w skale, stosuje się powszechnie kotwy skalne do wzmacniania i stabilizowania skał otaczających korytarze podziemne. Doświadczenia uzyskane w Skandynawii wskazują, że stosowanie badań nieniszczących do badania kotew jest niezbędne zarówno w czasie ich instalacji jak i później, w czasie ich eksploatacji. Świadomość, że istnieje instrument, który jest zdolny wykryć wady wynikające z niepoprawnego wklejenia kotew, podnosi znacznie jakość prac związanych z montażem kotew. Ocena wytrzymałości kotew, które po jakimś czasie uległy korozji w konstrukcjach typu tunele drogowe czy kolejowe ma ogromne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowania tych obiektów.

W artykule przedstawiono metody testowania kotew, zwłaszcza kotew wklejanych, przy użyciu ultradźwiękowych fal prowadzonych. Artykuł nie wyczerpuje zagadnienia testowania kotew, gdyż na skutek postępu technologicznego stosuje się dziś kotwy różnych typów, np., nowoczesne kotwy dynamiczne, które są zaprojektowane w taki sposób, aby wytrzymały wstrząsy sejsmiczne i tłumyły wybuchy skał, które mogą się zdarzyć, i nadal chronić bloki skalne przed odpadnięciem.

Rozwój metod testowania kotew miał miejsce nie tylko w Skandynawii, gdzie istnieje ogromna ilość obiektów wydążonych w skałach, ale także w Australii i Republice Południowej Afryki, gdzie istnieje rozwinięty przemysł górniczy.

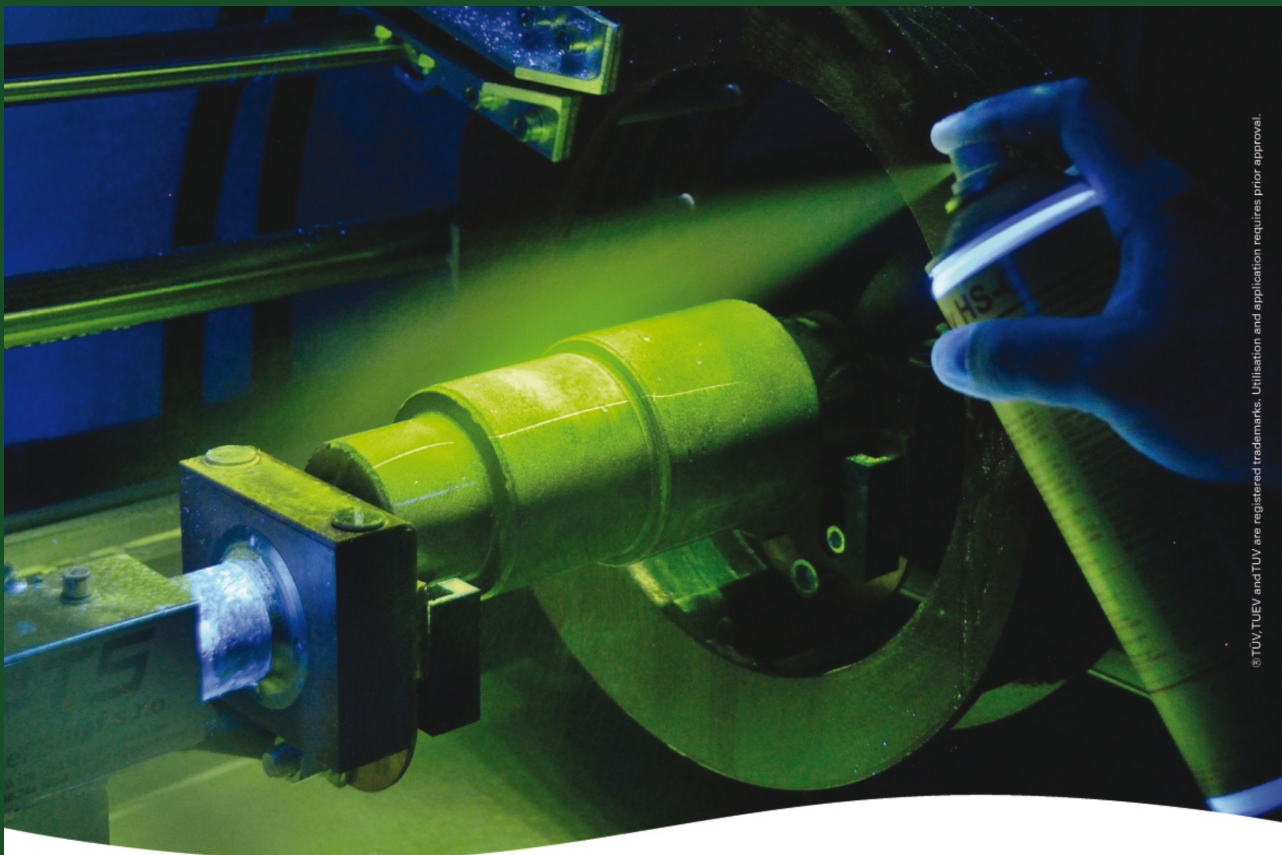
6. Literatura

- [1] Li, C. C., "Principles of rockbolting design", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9(3), 396–414 (2017).
- [2] Bobet, A. and Einstein, H., "Tunnel reinforcement with rockbolts", *Tunnelling and Underground Space Technology* 26 (1), 100–123 (2011).
- [3] Buys, B. J., Heyns, P. S., and Loveday, P. W., "Rock bolt condition monitoring using ultrasonic guided waves", *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 108, 97–105 (2009).
- [4] Beard, M. D., Lowe, M. J. S., "Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic waves," *International journal of rock mechanics and mining sciences* 40 (4), 527–536 (2003).
- [5] Starkey, A., Ivanovic, A., Neilson, R. D., and Rodger, A. A., "Using a lumped parameter dynamic model of a rock bolt to produce training data for a neural network for diagnosis of real data", *Meccanica* 38, 133–44 (2003).
- [6] Han, S. I., Lee, I. M., Lee, Y. J., and Lee, J. S., "Evaluation of rock bolt integrity using guided ultrasonic waves," *Geotechnical Testing Journal, ASTM* 32 (1), 31–38 (2009).
- [7] Song, G., Li, W., Wang, B., and Ho, S., "A review of rock bolt monitoring using smart sensors," *Sensors* 17 (4), 776 (2017).
- [8] Wang, B., Huo, L., Chen, D., Li, W., and Song, G., "Impedance-based pre-stress monitoring of rock bolts using a piezoceramic-based smart washer – a feasibility study," *Sensors* 17(2), 250 (2017).
- [9] Chen, D., Huo, L., Li, H., and Song, G., "A fiber bragg grating (fbg)-enabled smart washer for bolt pre-load measurement: Design, analysis, calibration, and experimental validation," *Sensors* 18(8), 2586 (2018).
- [10] Thurner, H., "Boltometer, final report," tech. rep., GEODYNAMIK AB, Stockholm (1994).
- [11] Stepinski, T. and Mattson, K.-J., "New instrument for rock bolt inspection using guided waves," in 11th World Conference on Non-Destructive Testing, (2014).
- [12] Stepinski, T. and Mattson, K.-J., "Rock bolt inspection by means of RBT instrument," in 19th World Conference on Non-Destructive Testing, (2016).
- [13] Stepinski, T., "Rockbolt monitoring by means of guided waves". In *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIII* (Vol. 10972, p. 109721C). International Society for Optics and Photonics (2019).
- [14] Andersson P., Krekula S., and Stepinski, T., "Verification of an instrument for non-destructive testing of cement grouted rock bolts", *BeFo Report*186, 2019.



Profesor Tadeusz Stepinski

urodzony w 1950r w Szczecinie. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 1983r. na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. W sierpniu 1988r. rozpoczął pracę w Szwecji na Wydziale Technologii, Uppsala University, w charakterze pracownika naukowo-badawczego. W 1994 roku uzyskał stopień naukowy docenta w Uppsala University (szwedzki odpowiednik polskiego stopnia doktora habilitowanego), a w roku 2002 stopień naukowy profesora Uppsala University w dziedzinie metrologii elektrycznej. W październiku 2011 roku uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie badań nieniszczących (kolokwium odbyło się na Wydz. Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH). W marcu 2012 roku został zatrudniony na stanowisku profesora AGH. W grudniu 2016 roku uzyskał tytuł profesora nauk technicznych.



© TÜV, TÜEV and TÜV are registered trademarks. Utilisation and application requires prior approval.

Szkolenia, egzaminy i certyfikacja personelu NDT



AC 195



VT



MT



PT



UT



RT



ET

NOWOŚĆ – SZKOLENIA DOFINANSOWANE!

www.tuv.pl

 **TÜVRheinland®**
Precisely Right.