

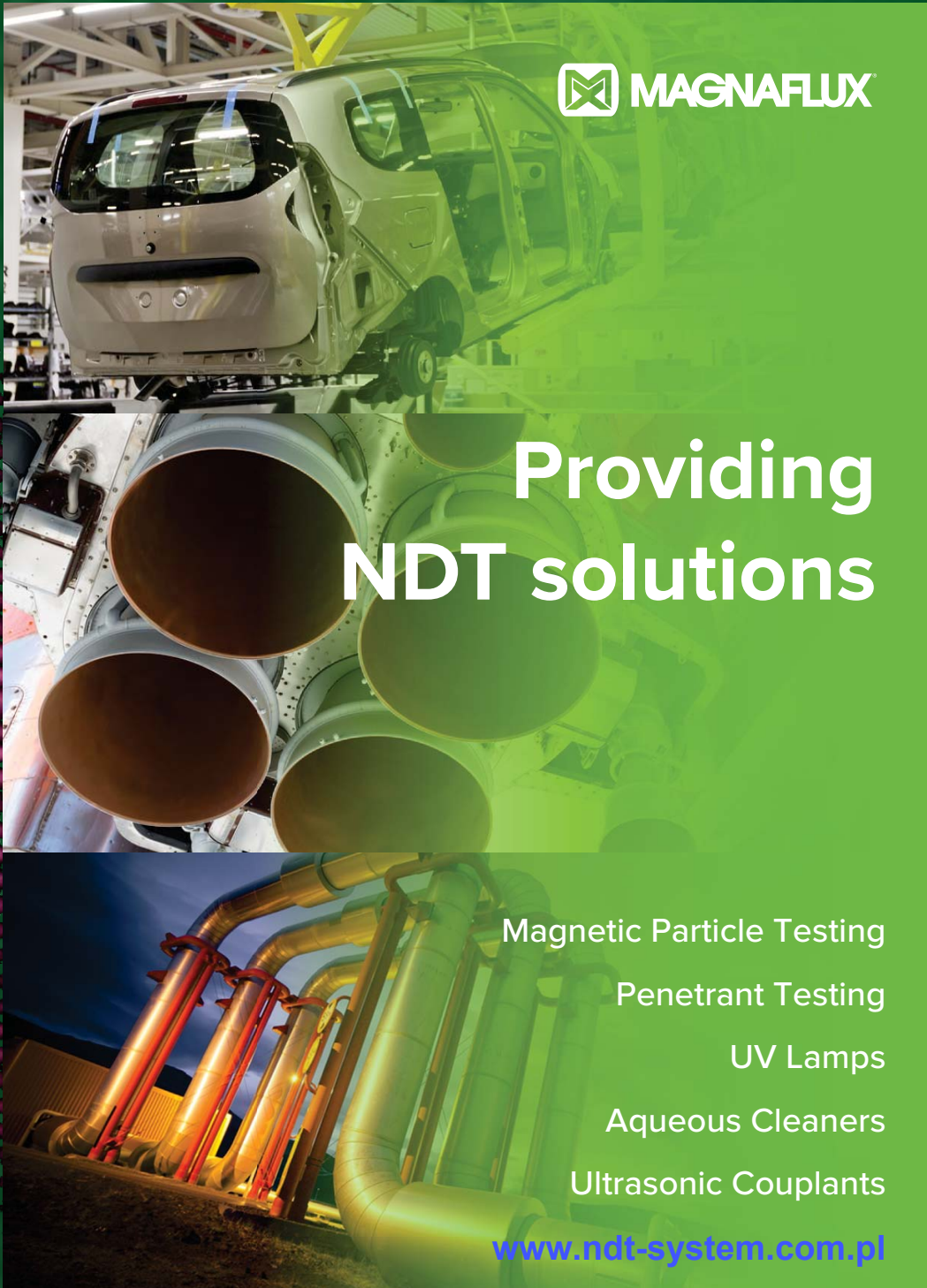
Badania Nieniszczące 1 - 4 / 2023 i Diagnostyka


Kwartalnik Naukowo-Techniczny

Nondestructive Testing and Diagnostics

50. KKBN

www.kkbn.pl



 MAGNAFLUX

Providing NDT solutions

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

www.ndt-system.com.pl

DXR75P-HR

Mały system obrazowania o najwyższej rozdzielczości do krytycznych zastosowań

Detektor DXR75P-HR daje wysoką rozdzielczość pikseli 75 μm , wymaganą do rozróżnienia drobnych szczegółów w krytycznych zastosowaniach. Detektor obejmuje kontrolę spoin klasy B według ISO 17636-2, dając precyzyjne obrazy spełniające najostrzejsze wymagania.



Dzięki małej szerokości detektor jest idealny do tworzenia obrazów w sytuacjach o ograniczonej swobodzie ustawienia.

DXR75P-HR jest odpowiedni do zastosowań krytycznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola spoin w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce i lotnictwie:**
 - rurociągi transportowe
 - złożone konstrukcje (odcinki rurociągu)
 - rury kotłowe
 - przewody paliwowe
 - rury ciśnieniowe
 - zbiorniki ciśnieniowe i magazynowe
- **kontrola spoin w okrętownictwie**

DXR140P-HE

Duży system obrazowania o wysokim kontraście do radiografii o wysokiej energii

DXR140P-HE jest idealnym przenośnym detektorem przeznaczonym do zastosowań o wysokiej energii (izotopowych). Optymalne wewnętrzne ekranowanie zapobiega promieniowaniu rozproszonemu o niskiej energii, ujemnie wpływającemu na jakość obrazu i żywotność elektroniki.



Detektor DXR140P-HE może być stosowany z izotopami i promieniowaniem RTG o wysokiej energii (powyżej 450 kV), jest odpowiedni do ogólnych zastosowań radiograficznych, takich jak (ale bez ograniczenia):

- **kontrola eksploatacyjna w przemyśle naftowym i gazowym oraz w energetyce:**
 - badanie korozji pod izolacją
 - pozycjonowanie zaworów
 - pomiar grubości ścianki
 - badanie podpór rurociągów
 - rury kotłowe
- **kontrola odlewów**
- **konserwacja, naprawa i przeglądy w lotnictwie**
- **przemysł zbrojeniowy i bezpieczeństwo**
- **kontrola konstrukcji:**
 - beton, mosty, podpory, ...
- **nauka, sztuka i archeologia**
- **kontrola linii energetycznych, kontrola GIS**



Badania Nieniszczące i Diagnostyka
Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Sabaly 11a, 71-341 Szczecin

e-mail: wydawnictwo@ptbnidt.pl
www.bnid.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY / EDITORIAL BOARD

REDAKTOR NACZELNY / EDITOR-IN-CHIEF
Tomasz Chady

Z-CY REDAKTORA NACZELNEGO / DEPUTES EDITOR-IN-CHIEF
Adam Sajek
Ryszard Pakos

CZŁONKOWIE REDAKCJI / MEMBERS OF THE BOARD
Jacek Grochowalski
Ryszard Łukaszk

REDAKTORZY DZIAŁOWI / SECTION EDITORS

METODOLOGIA BADAŃ / RESEARCH METHODOLOGY
Sławomir Mackiewicz, Marek Śliwowski

CERTYFIKACJA W BADANIACH / CERTIFICATION IN RESEARCH
Bogdan Piekarczyk

URZĄDZENIA I SYSTEMY BADAŃ
/ EQUIPMENT AND SYSTEMS FOR RESEARCH
Grzegorz Jezierski, Marek Lipnicki

PRAKTYKA PRZEMYSŁOWA BADAŃ
/ PRACTICE OF INDUSTRIAL RESEARCH
Krzysztof Dragan, Darek Wojdała

DIAGNOSTYKA / DIAGNOSTICS
Bogusław Ładecki,

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Ryszard Sikora, *Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Przewodniczący/President*

Prof. Krishnan Balasubramaniam, *Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*
Prof. Alexander Balitskii, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Gilmar F. Batalha, *University of Sao Paulo, Brasil*

Prof. Leonard J. Bond, *Iowa State University, USA*

Dr Pierre Calmon, *CEA, France*

Prof. Ermanno Cardelli, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Zhenmao Chen, *Xi'an Jiaotong University, China*

Prof. Leszek A. Dobrzański, *World Academy of Materials and Manufacturing Eng., Polska*

Dr Hubert Drzeniek, *AMIL Werkstofftechnologie GmbH, Germany*

Prof. Antonio Faba, *Università degli Studi di Perugia, Italy*

Prof. Nikolaos Gouskos, *University of Athens, Grece*

Mgr Paweł Grześkowiak, *UDT, Polska*

Prof. Jerzy Hoła, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Jolanta Janczak-Rusch, *Empa, Switzerland*

Mgr Ryszard Jawor, *Ryszard Jawor Usługi NDT, Polska*

Dr Grzegorz Jezierski, *Politechnika Opolska, Polska*

Inż. Sławomir Józwiak, *NDT Systems, Polska*

Mgr Pablo Katchadjian, *National Atomic Energy Commission of Argentina, Argentina*

Mgr Jan Kielczyk, *Energomontaż-Północ, Polska*

Mgr Jacek Kozłowski, *TEST PLB, Polska*

Prof. Marc Kreutzbruck, *University of Stuttgart, Germany*

Dr. Jochen Kurz, *DB Systemtechnik GmbH, Germany*

Mgr Marek Lipnicki, *KOLI, Polska*

Prof. Leonid M. Lobanow, *Paton Welding Institute, Ukraine*

Dr Sławomir Mackiewicz, *NDT SOFT, Polska*

Dr Wojciech Manaj, *Instytut Lotnictwa, Polska*

Dr Tadeusz Morawski, *Usługi Techniczne i Ekonomiczne "Level", Polska*

Prof. Zinovy T. Nazarchuk, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Dr Ryszard Nowicki, *GE Energy, Polska*

Prof. Mohachiro Oka, *Oita National College of Technology, Japan*

Dr Jolanta Radziszewska-Wolińska, *Instytut Kolejnictwa, Polska*

Prof. Helena Maria Geirinhas Ramos, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Joao M A Rebello, *Federal University of Rio de Janeiro, Brasil*

Prof. Artur Lopes Ribeiro, *Instituto Superior Técnico, Portugal*

Prof. Maria Helena Robert, *University of Campinas, Brasil*

Dr hab. Maciej Roskosz, *Politechnika Śląska, Polska*

Prof. Krzysztof Schabowicz, *Politechnika Wroclawska, Polska*

Prof. Valentin R. Skalsky, *National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

Prof. Jacek Stania, *Łukasiewicz – Górnosłaski Instytut Technologiczny, Polska*

Prof. Jacek Szelażek, *IPPT PAN, Polska*

Dr Marek Śliwowski, *NDTEST Warszawa, Polska*

Prof. Antonello Tamburrino, *University of Cassino and Southern Lazio, Italia*

Prof. Yuji Tsuchida, *Oita University, Japan*

Prof. Andrzej Tytko, *AGH Kraków, Polska*

Prof. Lalita Udpa, *Michigan State University, USA*

Prof. Gábor Vártesy, *Hungarian Academy of Sciences, Hungary*

Dr Grzegorz Wojas, *UDT, Polska*

Prof. Sławomir Wronka, *Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Polska*

Prof. Chunguang Xu, *Beijing Institute of Technology, China*

Prof. Noritaka Yusa, *Tohoku University, Japan*

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

NR 1-4/2023

ISSN 2451-4462 (ONLINE: 2543-7755)

VOLUMEN 8

SPIS TREŚCI

Adam Kondej, Dominik Kukla Nieniszcząca ocena grubości przypowierzchniowej warstwy azotków w technicznych stopach żelaza metodą prądów wirowych*	12
Tomasz Katz Modelowanie wykrywania wad kontaktowozmęczeniowych w szynach kolejowych metodą ultradźwiękową*	17
Piotr Bielawski Diagnozowanie potencjału eksploatacyjnego zespołu maszyn*	25
Tomasz Gorzelańczyk, Krzysztof Schabowicz Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych*	30
Alireza Akhlaghi Porosity measurement in CFRP*	37
Jerzy Kaszyński Problematyka badań nieniszczących w budownictwie na krajowych konferencjach KKBN - przeżyjmy to jeszcze raz	40
Maciej Martyna, Roman Martyna Możliwości i ograniczenia magnetycznej metody MRT badania stanu technicznego lin stalowych w czasie ich eksploatacji na urządzeniach dźwignicowych*	48
Mateusz Cybulski, Marek Lipnicki, Krzysztof Mroczek, Rafał Obląkowski Badania ultradźwiękowe Phased Array złączów choinkowych stopiek łopatek stopni L-0 po stronie turbiny i generatora w elektrowni jądrowej w Szwecji*	56
Bartosz Hyla, Michał Sobczak, Jakub Roemer Badania nieniszczące materiałów kompozytowych metodą termografii laserowej*	62
Mateusz Napiórkowski, Mariusz Szóstak, Krzysztof Schabowicz Nieniszczące, wizualne metody badań wykorzystujące wirtualną rzeczywistość w budownictwie – stan wiedzy*	67
Mateusz Wróbel, Maciej Szwed Fitness for service dla urządzeń ciśnieniowych – doświadczenia UDT*	72
Maciej Szwed, Tomasz Jakubowski, Michał Targoński Detekcja pęcherzy wodorowych metodami ultradźwiękowymi TOFD, TULA i Phased Array*	80
Karol Kaczmarek Wymagania normy PN-EN ISO 9712 dla egzaminu praktycznego w sektorach przemysłowych*	88
Marcin Lewandowski, Jakub Rozbicki, Hanna Smach, Piotr Karwat, Arkadiusz Szczurek, Jolanta Sala, Alicja Bera Modelowe rozwiązania skanerów UTPA do badań spawów dla wież wiatrowych, sekcji płaskich oraz konstrukcji wielkogabarytowych on-shore/off-shore*	97
Jakub Spytek, Kajetan Dziedzic, Łukasz Ambroziński, Łukasz Pieczonka Obrazowanie wad w strukturach cienkościennych z wykorzystaniem ultradźwiękowych fal przewodzonych*	101
Streszczenia artykułów zgłoszonych na 50. KKBN	105
Bogusław Ładecki, Joanna Augustyn-Nadzieja Problemy pęknięcia zmęczeniowego wału wirnika wentylatora ze stali C45*	120
Informacje BNID - Wspomnienie o plk. dr. inż. Romanie OSTROWSKIM	124
Informacje dla Autorów i Czytelników	125

* Artykuł recenzowany

PATRONAT I STAŁA WSPÓŁPRACA
PATRONAGE AND PERMANENT COOPERATION



PTBNiDT

Tomasz Gorzelańczyk*, Krzysztof Schabowicz

Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Przegląd nowoczesnych metod nieniszczących wykorzystywanych do badania płyt włóknisto-cementowych

Review of modern non-destructive methods used to test fiber-cement boards method system

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono i omówiono wybrane nowoczesne metody nieniszczące wykorzystywane do badania materiałów kompozytowych jakim są płyty włóknisto-cementowe. Omówiono metodę ultradźwiękową, w tym również z wykorzystaniem fal Lamba, metodę emisji akustycznej, metodę terahercową i metodę optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM. Wszystkie te metody zostały z powodzeniem wykorzystane w badaniach, w tym również w badaniach własnych autorów, co jednoznacznie potwierdza ich przydatność w badaniu płyt włóknisto-cementowych.

Słowa kluczowe: płyty włóknisto-cementowe; badania nieniszczące; ultradźwięki; emisja akustyczna; SEM

ABSTRACT

The article presents and discusses selected modern non-destructive methods used to test composite materials such as fiber-cement boards. The ultrasonic method, including the Lamb wave method, the acoustic emission method, the terahertz method and the optical method using the scanning electron microscope (SEM) are discussed. All these methods have been successfully used in research, including the authors' own research, which clearly confirms their usefulness in the study of fiber-cement boards.

Keywords: fibre-cement boards; non-destructive methods; ultrasounds; acoustic emission; SEM

1. Wstęp

Płyty włóknisto-cementowe są wyrobem budowlanym stosowanym w budownictwie od początku ubiegłego wieku. Pomysłodawcą był czeski inżynier Ludwik Hatschek, który opracował i opatentował technologię produkcji tego kompozytowego materiału, który nosił nazwę „Eternit”. Materiał ten był lekki, wytrzymały, trwały i niepalny. Płyta włóknisto-cementowa stała się jednym z najbardziej popularnych pokryw dachowych na świecie w XX w. [1],[2],[3]. Było tak do momentu, kiedy jednoznacznie stwierdzono, że azbest ma właściwości rakotwórcze. W latach 90 niebezpieczny dla zdrowia składnik zastąpiono bezpiecznymi włóknami, głównie celulozowymi. Obecnie produkowane płyty włóknisto-cementowe składają się z cementu, włókien celulozowych, włókien syntetycznych oraz różnych dodatków i domieszek, i stanowią zupełnie inny już wyrób budowlany [4],[5], który nadal wymaga prowadzenia nowych badań. Dodatkowymi składnikami i wypełniaczami płyt włóknisto-cementowych są mączka wapienna, mika, perlit, kaolin, mikrosfera oraz materiały z recyklingu [6], co pozwala uznać je za wyrób innowacyjny, który wpisuje się z powodzeniem w zasady zrównoważonego rozwoju. Obecnie płyty te stosowane są w budownictwie przede wszystkim jako okładzina elewacyjna w systemie elewacji

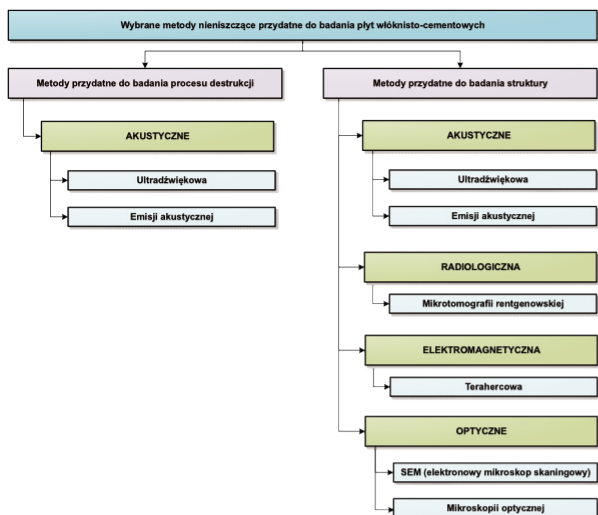
wentylowanych [7]. Warto zaznaczyć, że większość dotychczasowych badań płyt włóknisto-cementowych dotyczyło jedynie określenia normowych parametrów fizyko-mechanicznych, wpływu czynników eksploatacyjnych, takich jak: cykle namaczania i suszenia, cykle zamrażania i rozmrażania, wpływ grzania i deszczowania, wysokich temperatur oraz wpływu zastosowania różnych rodzajów włókien i procesów produkcyjnych, poprzez badanie tylko wytrzymałości na zginanie MOR [8]. W literaturze można odnaleźć jednakże nieliczne badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metod nieniszczących, które zostaną przedstawione i opisane w dalszej części artykułu. Należy zaznaczyć, że w dalszej części artykułu zostaną przedstawione jedynie wybrane metody nieniszczące, które najczęściej stanowiły badania własne autorów, często we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi.

2. Przegląd wybranych nowoczesnych metod

W nawiązaniu do informacji zawartych w literaturze [9] w aspekcie badań płyt włóknisto-cementowych, metody nieniszczące można podzielić na dwie zasadnicze grupy, tj. takie, które pozwalają ocenić proces destrukcji oraz metody pozwalające na badanie struktury materiału kompozytowego. Podział ten pokazano przykładowo na rysunku 1. W dalszej części pracy zostaną omówione wybrane nowoczesne metody nieniszczące wykorzystywane przez autorów w badaniach materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych. Warto

*Autor korespondencyjny.

E-mail: tomasz.gorzelanzyk@pwr.edu.pl



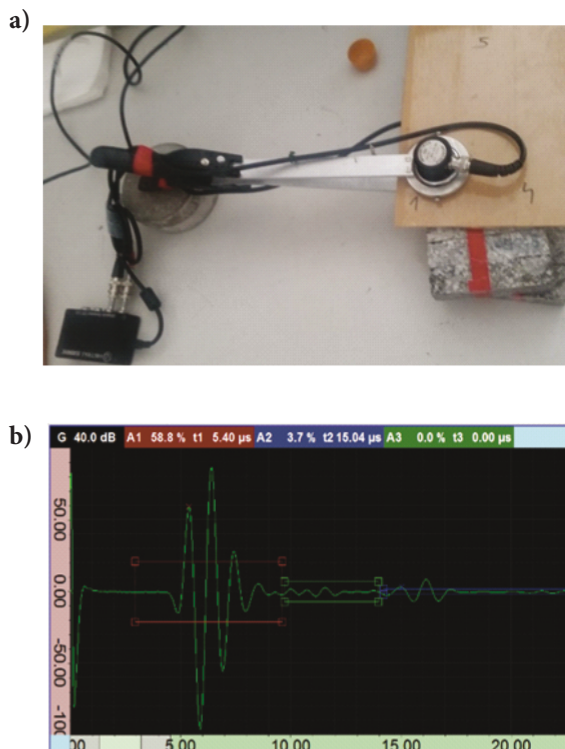
Rys. 1. Podział wybranych metod nieniszczących przydatnych do badania kompozytów włóknisto-cementowych

Fig. 1. Division of selected non-destructive methods useful for testing fiber-cement composites

zaznaczyć, że część metod zostało pioniersko wdrożonych przez autorów do badania przedmiotowych materiałów kompozytowych, czego rezultatem są liczne publikacje oraz uzyskane patenty.

2.1 Badania metodą ultradźwiękową

Metoda ultradźwiękowa opiera się na związkach pomiędzy prędkością fal sprężystych o wysokiej częstotliwości powyżej 20 kHz rozprzestrzeniających się w ośrodku stałym, a właściwościami tego ośrodka. Dotychczas badania metodą ultradźwiękową na szeroką skalę prowadzone były głównie dla betonu i stali. Niewiele natomiast jest w literaturze zastosowań tej metody do badania kompozytów cementowych (o grubości do 15mm) i zmian zachodzących w ich strukturze, a w szczególności płyt włóknisto-cementowych. Nowatorskie urządzenie ultradźwiękowe do wykrywania delaminacji w płytach włóknisto-cementowych zostało opatentowane przez zespoły z IPPT PAN i Politechniki Wrocławskiej [9],[10], które przedstawiono na rysunku 2a. Urządzenie to umożliwia wykrywanie delaminacji o długości powyżej 10 mm w płytach włóknisto-cementowych o grubości od 4 mm do 40 mm oraz zapewnia wysoką dokładność wyznaczania prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w badanym materiale poprzez zastosowanie cyfrowego defektoskopu ultradźwiękowego. Wykrywanie delaminacji w płytach włóknisto-cementowych odbywa się na zasadzie pomiaru lokalnych zmian prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej i porównania ich z prędkością podłużnej fali ultradźwiękowej we wzorcowej próbce pozbawionej delaminacji. Na rysunku 2b pokazano przykładowy przebieg fali ultradźwiękowej zarejestrowanej urządzeniem do wykrywania delaminacji podczas badania płyt włóknisto-cementowych.



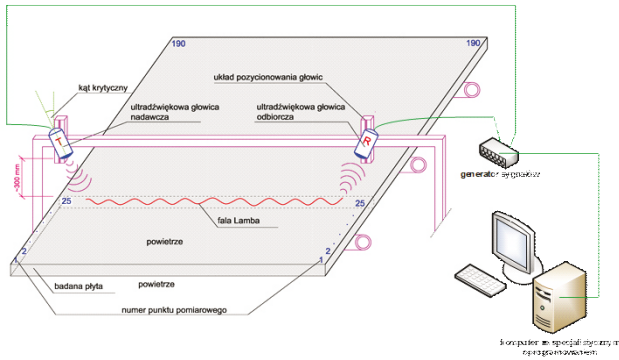
Rys. 2. Urządzenie ultradźwiękowe do wykrywania delaminacji w płytach włóknisto-cementowych: a) widok urządzenia, b) przykładowy przebiegi fali ultradźwiękowej zarejestrowanej podczas badania [9],[10]

Fig. 2. Ultrasonic device for detecting delamination in fiber-cement boards: a) view of the device, b) example waveforms of the ultrasonic wave recorded during the test [9],[10]

Porównanie zmian prędkości fali ultradźwiękowej w różnych miejscach, a co za tym idzie zmian gęstości płyty poddanej procesowi destrukcji z płytą referencyjną pozwala zgrubnie zidentyfikować obszary zmian w strukturze płyt i tym samym wskazać miejsca do dalszych badań z użyciem innych metod, np. metody emisji akustycznej.

2.2 Badania metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem fal Lamba

Do fal ultradźwiękowych zalicza się także fale płytowe Lamba, które są odmianą powierzchniowych fal sprężystych. Rozchodzą się one w ośrodku ograniczonym dwoma równoległymi płaszczyznami, których odległość jest porównywalna z długością fali i nie przekracza kilku długości fali. Przekazywanie drgań sąsiednim cząstką jest wynikiem nakładania się na siebie dwóch fal Rayleigha, biegnących po obydwu powierzchniach w tym samym kierunku [11]. W pracach [12], [13] przedstawiono możliwość wykorzystania fal Lamba w ultradźwiękowym bezdotykowym skanerze do wykrywania wad w płytach włóknisto-cementowych jeszcze na etapie produkcji. Na rysunku 3 przedstawiono schemat i widok konstrukcji zbudowanego na linii produkcyjnej bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego [12]. Układ pomiarowy w postaci stacjonarnego bezkontaktowego skanera ultra-dźwiękowego bazuje na wzbudzeniu fali



Rys. 3. Schemat i widok stacjonarnego bezkontaktowego skanera ultradźwiękowego [9], [12]

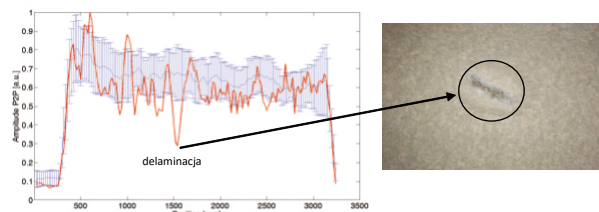
Fig. 3. Schematic and view of the stationary non-contact ultrasonic scanner [9], [12]

sprężystej w badanym elemencie. Wykorzystuje się tu technikę przechodzącej fali Lamba wprowadzanej do materiału badanego przez powietrze, bez kontaktu głowic nadawczej (T) i odbiorczej (R) z testowanym materiałem [14],[15],[16]. Obydwie głowice umieszczone są po tej samej stronie badanej płyty na przeciwległych jej krawędziach, obejmujących całą szerokość płyty.

Za pomocą tego urządzenia podczas produkcji można wykrywać delaminacje lub ubytki i nieciągłości w strukturze, co pozwala w konsekwencji wyeliminować wadliwą partię płyt. Można również za pomocą tego skanera badać rozkład wilgotności po długości płyty, co pokazano w pracy [13]. Przykładowy wynik pomiaru skanerem ultradźwiękowym, obrazujący wykrycie delaminacji w płycie włókno-cementowej pokazano na rysunku 4.

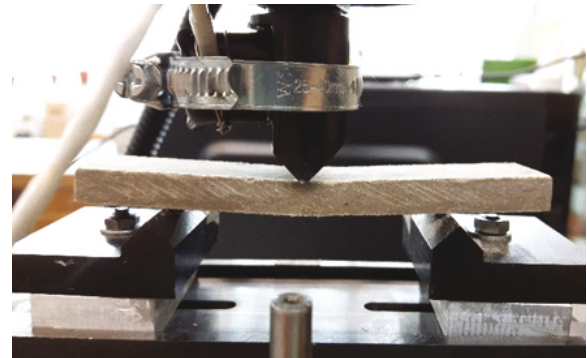
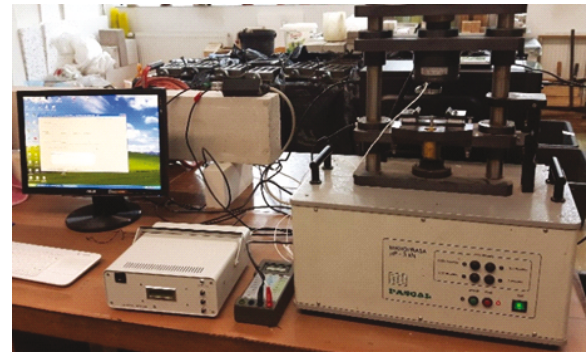
2.3 Badania metodą emisji akustycznej

Metoda emisji akustycznej (EA) opiera się na znajomości zjawisk powstawania i rozprzestrzeniania się w danym ośrodku fal sprężystych, powstałych w materiale wskutek wyzwolenia zakumulowanej w nim energii sprężystej [17]. Należy ona do grupy metod pasywnych, to znaczy, że aparatura EA nie emituje sygnałów i nie wpływa na stan fizyczny badanego obiektu, natomiast rejestruje jedynie efekty fizyczne samoistnie powstające w monitorowanym materiale, elemencie itp., w tym proces ich niszczenia i zmiany struktury. Źródłami sygnału emisji akustycznej są powstające i propagujące mikrorysy, procesy korozyjne, pękanie strun w konstrukcjach sprężonych, itp. Źródła EA generują fale



Rys. 4. Przykładowe wyniki badań uzyskane bezkontaktowym skanerem ultradźwiękowym [13]

Fig. 4. Exemplary test results obtained with a non-contact ultrasonic scanner [13]



Rys. 5. Widok stanowiska badawczego do pomiarów metodą emisji akustycznej (po lewej) wraz z powiększeniem próbki płyty włókno-cementowej w trakcie badania (po prawej).

Fig. 5. View of the test bench for measurement with the acoustic emission method (left) along with the enlargement of the fiber-cement board sample during the test (right).

sprężyste w objętości badanego materiału, a propagują się na powierzchni ograniczającej materiał [18]. Na powierzchni fale te mogą wówczas zostać zarejestrowane przez odpowiednie przetworniki, które przekształcają je na napięcie elektryczne. Badania własne autorów, jak i innych badaczy jednoznacznie pokazały przydatność tej metody w ocenie zmian destrukcyjnych, które zachodzą w strukturze płyt włókno-cementowych pod wpływem różnych czynników eksploatacyjnych w tym m. innymi wysoka temperatura, pożar oraz wielokrotne cykle zamrażania-rozmrażania [19], [20], [21], [22], [23]. Przedmiotowe badania wykonywano w próbie trójpunktowego zginania na stanowisku pokazanym na rysunku 5.

Do analizy procesu destrukcji posłużono się deskryptorami emisji akustycznej takimi jak tempo, suma i energia zdarzeń oraz zarejestrowaną wytrzymałością na zginanie MOR. Na podstawie zarejestrowanych sygnałów EA określano wzorcowe charakterystyki widma akustycznego dla włókien i matrycy cementowej. Następnie wykonywano analizę otrzymanych rezultatów z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych [24], [25], [26], [27] w celu rozróżnienia charakterystyk widmowych EA oznaczających pęknięcia matrycy i włókien oraz oszacowania ilości zawartych włókien w płytach poddanych procesowi destrukcji. Na rysunku 6 pokazano przykładowy przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu, dla płyty poddanej oddziaływaniu ognia wraz z naniesioną identyfikacją



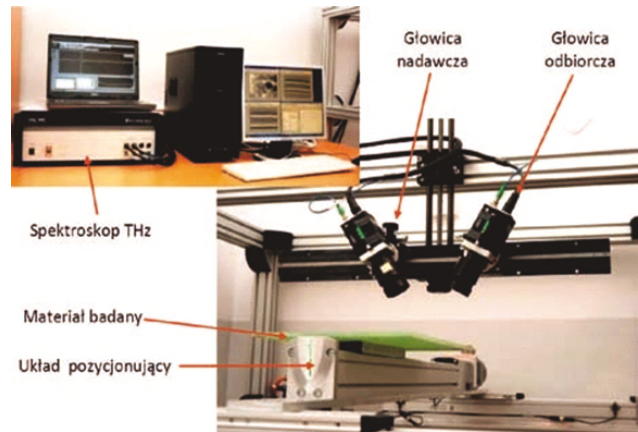
Rys. 6. Przebieg tempa zdarzeń N_{zd} , naprężeń zginających σ_m w funkcji czasu, dla płyty poddanej oddziaływaniu ognia wraz z naniesioną identyfikacją wzorcowych charakterystyk widmowych [19]

Fig. 6. Events rate N_{ev} and flexural stress σ_m versus time for a board exposed to fire, with marked recognized reference spectral characteristics [19]

wzorcowych charakterystyk widmowych uzyskany z badań metodą emisji akustycznej.

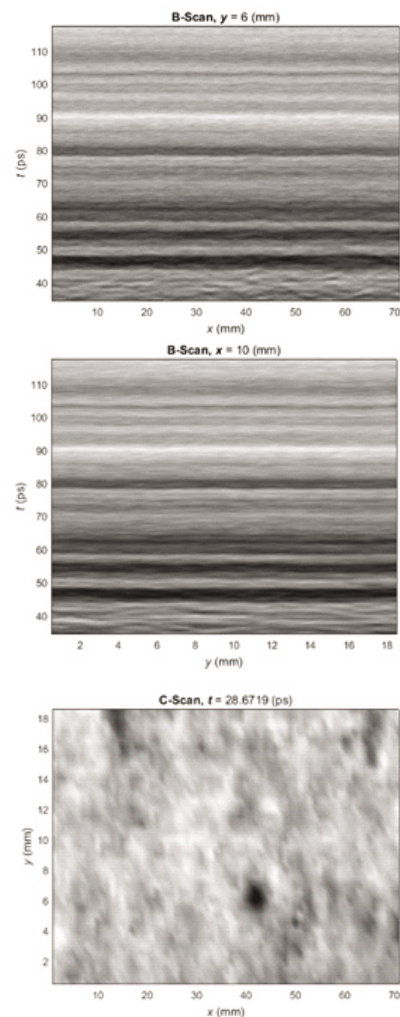
2.4 Badania metodą terahercową

Metoda terahercowa wykorzystuje fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości (0,5-10 THz) i jest coraz częściej wykorzystywana w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [28]. Właściwości promieniowania terahercowego (ang. T-Ray) dają możliwość wykorzystania ich do diagnostyki materiałów kompozytowych. Systemy terahercowe pracujące w dziedzinie czasu przekazują sygnały zawierające dokładną informację o wewnętrznej strukturze materiałów poddanych badaniu. Technologia terahercowa w badaniach nieniszczących wykorzystywana jest do oceny stanu różnych struktur nieprzewodzących m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok malarskich i materiałów ceramicznych. Omawiane urządzenia pozwalają wykrywać defekty takie jak: rozwarstwienia, puste przestrzenie, braki kleju, braki żywicy, czy nierównomierności wzmocnienia. Na rysunku 7 pokazano przykładowo widok systemu do badań metodą terahercową [29]. Z kolei na rysunku 8 zamieszczono przykładowe sygnały zarejestrowane dla płyty włóknisto-cementowej z wykorzystaniem tej metody [29]. W pracach [29],[30] przeprowadzono pilotażowe badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem metody terahercowej. Wstępne badania potwierdziły przydatność zaproponowanej metody do badań płyt włóknisto-cementowych. Sygnały terahercowe mają charakter bardzo zbliżony do tych uzyskiwanych w metodach ultradźwiękowych. Zaletami T-Ray jest duża rozdzielczość sygnałów, pomiar bezkontaktowy i bardzo krótki czas pomiaru.



Rys. 7. Przykładowy widok systemu do badań metodą terahercową [29]

Fig. 7. Photo of the system for terahertz inspection [29]



Rys. 8. Przykładowe sygnały zmierzone dla płyty włóknisto-cementowej z wykorzystaniem metody terahercowej [29]

Fig. 8. Exemplary signals measured for a fiber-cement board using the terahertz method [29]

2.5 Badania metodą optyczną z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM)

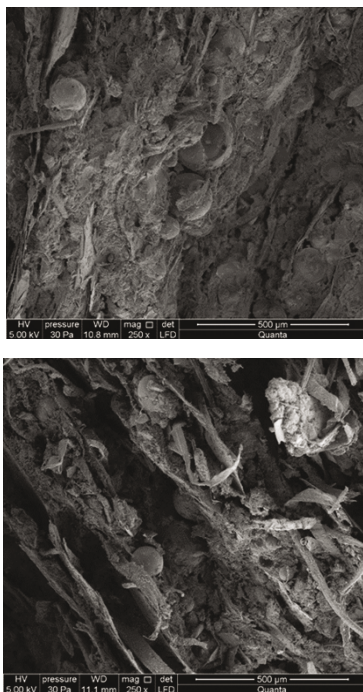
Mikroskopy elektronowe do tworzenia obrazu wykorzystują wiązkę elektronów, która emitowana jest z katody, przyspieszana w polu elektrycznym i formowana przez układ

soczewek elektromagnetycznych. Rozdzielczość uzyskanego obrazu zależy od długości fali elektronów, która jest funkcją użytego napięcia przyspieszającego (im większe napięcie, tym długość fali krótsza i lepsza rozdzielczość) oraz średnicy wiązki. Mikroskopy elektronowe dzieli się na skaningowe i transmisyjne. Metoda optyczna z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego SEM (ang. Scanning Electron Microscope) jest szeroko wykorzystywana do badania mikrostruktury różnych materiałów, w tym kompozytowych [31],[32]. Na rysunku 9 pokazano przykładowy widok skaningowego mikroskopu elektronowego z analizatorem EDS. Z kolei na rysunku 10 pokazano przykładowe obrazy płyt włóknisto-cementowych uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego.



Rys. 9. Widok skaningowego mikroskopu elektronowego z analizatorem EDS [32]

Fig. 9. View of a scanning electron microscope with an EDS analyzer [32]



Rys. 10. Przykładowe obrazy płyt włóknisto-cementowych uzyskane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego [32]

Fig. 10. Exemplary images of fiber-cement boards obtained using a scanning electron microscope [32]

Mikroskopia skaningowa pozwala ocenić kształt i wielkość ziaren, morfologię powierzchni, obecność zrostów, wtrąceń, spękań, sposób zabudowy przestrzeni, kształt porów. Główną zaletą metody jest bardzo prosta preparatyka. Próbkę mają postać okruchów lub przełamów. Zaletą techniki SEM jest bardzo duże powiększenie do kilku tysięcy razy, z jednoczesnym uzyskaniem rozdzielczości możliwej do oceny wiązków cementowych i pojedynczych włókien [8], [33]. Rozwój tej metody w wizualizacji materiałów do nanometrycznej wielkości dąży do wykrycia wszelkich, do tej pory niewidocznych efektów, spowodowanych przez oddziaływanie różnych czynników na strukturę badanego materiału. Badania matrycy cementowej wzmocnionej włóknami celulozowymi z zastosowaniem techniki SEM opisano w pracach [8],[34]. Z kolei w [32] zaprezentowano wyniki badań skaningowych płyt włóknisto-cementowych poddanych wysokiej temperaturze i zmiennym cyklem zamrażania i rozmrażania. Autorzy na podstawie badań własnych udowodnili przydatność tej metody do próby oceny zachodzących w mikrostrukturze płyt włóknisto-cementowych zmian pod wpływem określonych czynników eksploatacyjnych.

3. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonego powyżej przeglądu nowoczesnych nieniszczących metod badawczych można jednoznacznie stwierdzić, że są one przydatne w badaniu materiałów kompozytowych włóknisto-cementowych. Jednakże z uwagi na ograniczoną objętość niniejszego artykułu autorzy nie mogli dokonać opisu wszystkich dostępnych metod. W związku z tym w tabeli 1 w ramach podsumowania dodatkowo zestawiono wybrane wady i uszkodzenia związane z produkcją tj. imperfekcje geometryczne i materiałowe. Zaproponowano również pojęcia dotyczące ich opisu w badaniach płyt włóknisto-cementowych i przyporządkowano metody przydatne do ich badania wszystkim znanymi autorom nowoczesnymi metodami nieniszczącymi.

Podsumowując, autorzy chcą zaznaczyć, że wymagania normowe dla płyt włóknisto-cementowych [4] dopuszczają pod wpływem działania czynników eksploatacyjno-klimatycznych obniżenie wytrzymałości *MOR*, co może świadczyć o dopuszczeniu pewnych zmian powstałych w strukturze płyty. Badania normowe opierają się w zasadzie jedynie na kontroli wytrzymałości na zginanie *MOR*. Zdaniem autorów może to być jednak niewystarczające. Dlatego istnieje potrzeba dokładnego rozpoznania procesów i zmian zachodzących w strukturze płyty włóknisto-cementowej pod wpływem różnych czynników eksploatacyjnych, powodujących „osłabienie” płyty. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji płyt włóknisto-cementowych. Przydatne w tym celu okazują się metody nieniszczące, dające szersze możliwości badawcze oraz możliwość rozpoznania i identyfikacji procesu destrukcji płyt pod wpływem czynników eksploatacyjnych.

Tab. 1. Zestawienie wybranych imperfekcji geometrycznych i materiałowych wraz z zaproponowanymi pojęciami dotyczącymi ich opisu i z przyporządkowaniem metod przydatnych do ich badania [9]

Tab. 1. List of selected geometric and material imperfections along with proposed concepts for their description and assignment of methods useful for their study [9]

Rodzaj/opis imperfekcji		Metoda badań						
		Ultradźwiękowa	Emisji akustycznej	Ultradźwiękowa i emisji akustycznej	Teraherzowa	Tomografii rentgenowskiej	Optyczna mikroskop elektronowy	Optyczna mikroskop skaningowy
Nieprawidłowa grubość płyty	identyfikacja	●	-	●	●	-	-	-
	lokalizacja	●	-	●	○	-	-	-
	rozległość	●	-	●	○	-	-	-
	intensywność	○	-	○	○	-	-	-
Delaminacja	identyfikacja	●	○	●	●	●	●	●
	lokalizacja	●	-	●	●	○	●	●
	rozległość	●	-	●	○	●	○	●
	intensywność	-	-	-	●	-	-	○
Rysy	identyfikacja	●	○	●	●	●	●	●
	lokalizacja	●	-	●	○	●	○	○
	rozległość	-	-	-	○	●	○	○
	intensywność	-	-	-	○	●	○	○

Oznaczenia: ● – metoda przydatna, ○ – metoda częściowo przydatna, - – metoda nieprzydatna

4. Literatura

- [1] Informacje ze strony internetowej: <http://www.equitone.com>
- [2] Informacje ze strony internetowej: <http://www.cembrit.com>
- [3] Informacje ze strony internetowej https://de.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Hatschek
- [4] PN-EN 12467+A2:2018-06. Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [5] Z. Ranachowski, K. Schabowicz "The Fabrication, Testing and Application of fibre cement boards" Cambridge Scholars Publishing, Newcastle, 2018.
- [6] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz „Badania płyt włóknisto-cementowych zawierających materiały z recyklingu” Materiały Budowlane nr 10, 27-29, 2015.
- [7] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków „Elewacje wentylowane” Architektura Murator, nr 6, dod. "Warsztat Architekta" nr 3, 36-53, 2017.
- [8] M. Ardanuy, J. Claramunt, R.D. Toledo Filho "Cellulosic Fibre Reinforced Cement-Based Composites: A Review of Recent Research" Construction and Building Materials nr 79, 115-28, 2015.
- [9] K. Schabowicz „Elewacje wentylowane : technologia produkcji i metody badania płyt włóknisto-cementowych” Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2018.
- [10] T. Dębowski, M. Lewandowski, S. Mackiewicz, Z. Ranachowski, K. Schabowicz „Badania ultradźwiękowe płyt włóknisto-cementowych” Przegląd Spawalnictwa, vol 88, Nr 10, 69-71, 2016.
- [11] A. Śliwiński „Ultradźwięki i ich zastosowanie” Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2001.
- [12] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk "A nondestructive methodology for the testing of fibre cement boards by means of a non-contact ultrasound scanner" Construction and Building Materials, vol. 102, 200-207, 2016.
- [13] R. Drelich, T. Gorzelańczyk, M. Pakuła, K. Schabowicz "Automated Control of Cellulose Fiber Cement Boards with a Non-Contact Ultrasound Scanner" Automation in Construction, vol. 57, 55-63, 2015.
- [14] G. Dobie, R. Summan, S.G. Pierce, W. Galbraith, G. Hayward "Noncontact ultrasonic platform for structural inspection" IEEE Sensors Journal, vol. 11, 2458-2468, 2011.
- [15] W. Moliński „Zastosowanie emisji akustycznej w badaniach drewna konstrukcyjnego” IPPT PAN, Warszawa, 1995.
- [16] G. Świt, A. Krampikowska, K. Schabowicz „Wstępna analiza możliwości wykorzystania metody emisji akustycznej w ocenie trwałości konstrukcji betonowych” Przegląd Spawalnictwa, vol 86, nr 10, 31-36, 2014.
- [17] I. Malecki, J. Ranachowski „Emisja akustyczna, źródła, metody, zastosowanie” KBN, Warszawa, 1994.
- [18] Z. Ranachowski „Emisja akustyczna w diagnostyce obiektów budowlanych” Drogi i Mosty, nr 2, 151-173, 2012.
- [19] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków "Identification of the degree of degradation of fibre-cement boards exposed

- to fire by means of the acoustic emission method and artificial neural networks” *Materials* nr 12, 1-17, 2019.
- [20] K. Schabowicz, T. Gorzelańczyk, M. Szymków “Identification of the degree of fibre-cement boards degradation under the influence of high temperature” *Automation in Construction* nr 101, 190-198, 2019.
- [21] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, M. Szymków “Application of the acoustic emission method and artificial neural networks to assess the damaging effect of high temperature on the structure of fibre-cement boards” *Materials* vol. 15, nr 18, 1-16, 2022.
- [22] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz “Effect of freeze–thaw cycling on the failure of fibre-cement boards, assessed using acoustic emission method and artificial neural network” *Materials* vol. 12, nr 13, s. 1-18, 2019.
- [23] A. Adamczak-Bugno, A. Krampikowska, G. Świt “ Analysis of the Frequency of Acoustic Emission Events in Terms of the Assessment of the Reduction of Mechanical Parameters of Cellulose–Cement Composites. *Materials* nr 14, 5882, 2021.
- [24] H. Adeli “Neural networks in civil engineering: 1989-2000” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* vol. 16, 126-142, 2001.
- [25] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz “Non-Destructive Testing of Moisture in Cellulose Fiber Cement Boards” 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), Prague, 2014.
- [26] E. Juskowiak, A. Małdachowska, M. Panek „Emisja akustyczna kompozytowych płyt przekładkowych podczas trójpunktowego zginania” *Przetwórstwo Tworzyw*, nr 4, 351-354, 2013.
- [27] D.M. McCann, M.C Forde “Review of NDT Methods in the Assessment of Concrete and Masonry Structures” *NDT & E International* vol. 34, 71-84, 2001.
- [28] D. Zimdars, J.A.Valdmanis, J.S. White, G. Stuk, S. Williamson, W.P. Winfree, E.I. Madaras “Technology and applications of terahertz imaging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation” *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 24, 570-577, 2005.
- [29] T. Chady, K. Schabowicz „Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu” *Badania Nieniszczące i Diagnostyka* nr 1-2, 62-66, 2016.
- [30] T. Tomasz, K. Schabowicz, M. Szymków “Automated multisource electromagnetic inspection of fibre-cement boards” *Automation in Construction* vol. 94, 383-394, 2018.
- [31] K. Schabowicz, D. Józwiak-Niedźwiedzka, Z. Ranachowski, S. Kudela Jr, T. Dvorak “Microstructural characterization of cellulose fibres in reinforced cement boards” *Archives of Civil and Mechanical Engineering* vol. 18, nr 4, 1068-1078, 2018.
- [32] A. Adamczak-Bugno, T. Gorzelańczyk, A. Krampikowska, M. Szymków „Nieniszczące badania struktury materiałów włóknisto-cementowych z użyciem elektronowego mikroskopu skaningowego” *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, nr 3, 20-23, 2017.
- [33] P. Goodhew, J. Humphreys, R. Beanland “*Electron Microscopy and Analysis*”, 3 ed., Taylor and Francis, London, 2001.
- [34] R.S.P. Coutts, P. Kightly “Bonding in Wood Fiber-Cement Composites” *Journal of Materials Science* vol. 19, 3355-3359, 1984.