

Tomasz Chady^{1*}, Krzysztof Schabowicz²¹ ZUT w Szczecinie, Polska² Politechnika Wroclawska, Polska

Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu

Non-destructive testing of fiber-cement boards using time domain terahertz spectroscopy

ABSTRACT

The article proposes the use of NDT method utilizing electromagnetic waves with frequencies in the terahertz range for the inspection of fiber-cement boards. First, the most frequently appearing material defects in the plates, are presented. The measurements of defective and flawless plates were carried out using the terahertz method and the selected results are presented. The preliminary tests have confirmed the usefulness of the proposed method for testing fiber cement boards.

Keywords: non-destructive testing, fiber-cement board, terahertz time domain spectroscopy

STRESZCZENIE

W artykule zaproponowano użycie metody badań nieniszczących wykorzystującej fale elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu teraherców do inspekcji płyt włóknisto-cementowych. Opisano najczęściej pojawiające się w płytach wady materiałowe. Przeprowadzono pomiary płyt wadliwych i pełnowartościowych z zastosowaniem urządzenia wykorzystującego metodę terahercową. Wstępne badania potwierdziły przydatność zaproponowanej metody do badań płyt włóknisto-cementowych.

Słowa Kluczowe: badania nieniszczące, płyty włóknisto-cementowe, spektroskopia terahercowa



Prezes PTBNiDT

Tomasz Chady

Adiunkt, Politechnika Wroclawska

Krzysztof Schabowicz

1. Wprowadzenie

Przedmiotem niniejszego artykułu są badania nieniszczące płyt włóknisto-cementowych, które stosowane są obecnie w architekturze jako okładziny na elewacje wentylowane, ale także jako okładziny wewnętrzne [1, 2]. Ich historia sięga początków XX wieku, kiedy to czeski inżynier L. Hatschek wymyślił i opatentował proces produkcji lekkich i wytrzymałych płyt okładzinowych. Płyty te zawierały wówczas azbest, który z czasem na skutek regulacji prawnych zastąpiono celulozą i włóknami PVA. W przypadku zastosowania na elewacje płyty te są narażone na działanie zmiennych czynników atmosferycznych, a zatem stawia się im odpowiednie wymagania odnośnie wytrzymałości, wilgotności masowej, nasiąkliwości, a przede wszystkim trwałości zgodnie z odpowiednimi regulacjami [3].

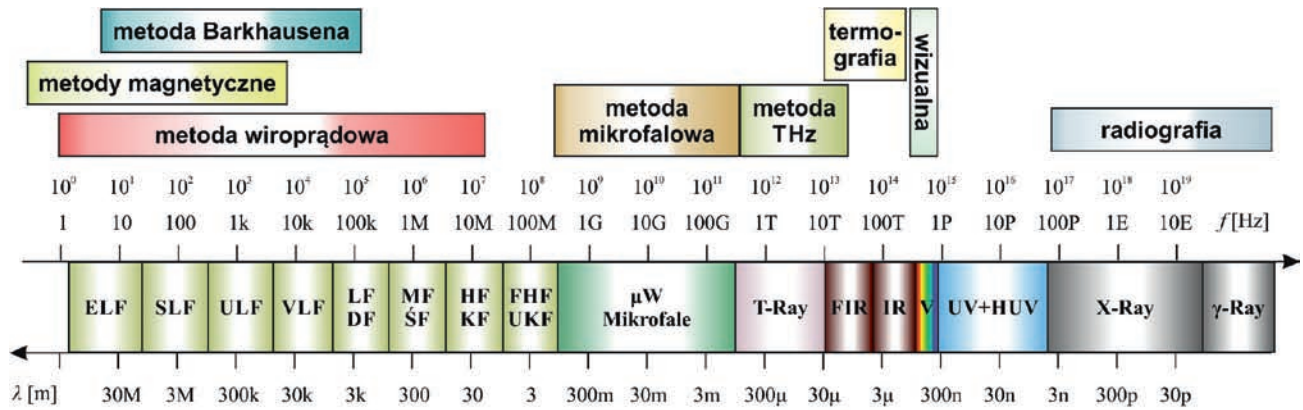
Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, iż w trakcie produkcji płyta formowana jest w tzw. kąpielii celulozowo-cementowej na bębnie formującym, na który nawijane są kolejne warstwy. Taki sposób produkcji powoduje, że ta kompozytowa płyta ma budowę warstwową. Na styku między warstwami może dochodzić do rozwarstwień między poszczególnymi warstwami

na skutek braku odpowiedniej adhezji. Płyta z taką wadą nie spełnia stawianych jej wymagań i nie nadaje się do wbudowania w obiekt budowlany. Wymaga to zatem kontroli już na etapie produkcji płyt włóknisto-cementowych. Obecnie, kontrola ta polega na badaniach wizualnych tzn. obserwacji powierzchni płyt. Nie jest to jednak badanie miarodajne i obarczone jest dużym błędem. Potrzebna jest zatem dokładniejsza metoda, która pozwoliłaby ocenić strukturę płyty, a szczególnie jej budowę wewnętrzną [4, 5]. Autorzy niniejszej pracy zaproponowali zastosowanie do takiej kontroli metody terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu. Fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości (0,5-10 THz) są coraz częściej wykorzystywane w różnych dziedzinach nauki i przemysłu [6]. Właściwości promieniowania terahercowego tworzą unikalną możliwość wykorzystania go do kontroli materiałów kompozytowych. W szczególności, systemy terahercowe pracujące w dziedzinie czasu dostarczają sygnały zawierające precyzyjną informację o wewnętrznej strukturze badanych materiałów.

2. Metoda terahercowa

Fale elektromagnetyczne o częstotliwościach mieszczących się w zakresie od 100 GHz do 10 THz nazywane były falami

* Autor korespondencyjny. E-mail: tomasz.chady@zut.edu.pl

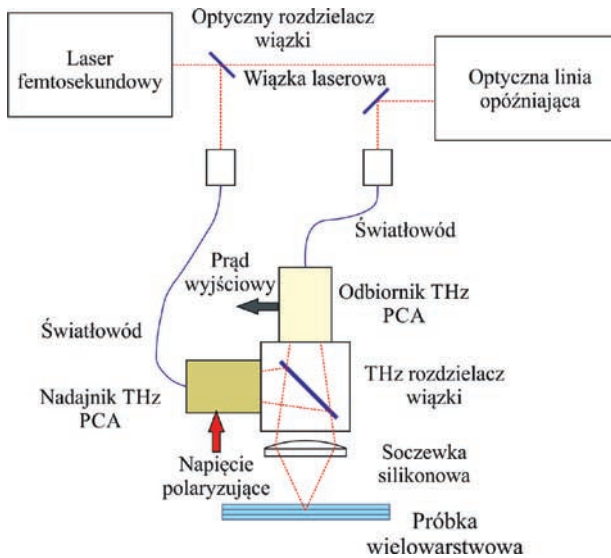


Rys. 1. Wykres zakresów częstotliwości używanych w różnych metodach badań nieniszczących
Fig. 1. Chart of frequency ranges used in different methods of non-destructive testing

submilimetrowymy ale obecnie coraz częściej stosowana jest nazwa „teraherce”, w skrócie „THz” lub „promieniowanie terahercowe” (ang. TRay). Pasma promieniowania terahercowego znajduje się pomiędzy mikrofalami z jednej strony a promieniowaniem podczerwonym z drugiej strony (rys. 1). Z tego powodu, czasami pasmo terahercowe nazywane jest również pasmem dalekiej podczerwieni (FIR ang. Far Infra-Red).

- nie jest jonizujące i przez to nie stanowi zagrożenia dla ludzi;
- umożliwia uzyskiwać obrazy badanych struktur o dużej rozdzielczości.

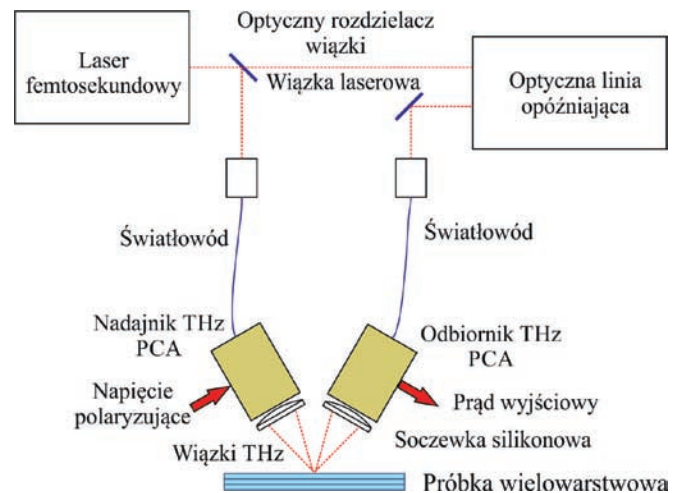
Wymienione właściwości promieniowania terahercowego spowodowały, iż wykorzystywane było w nauce i technice już od dłuższego czasu. Rozwój technologii terahercowej (metod generacji, detekcji, rejestracji i analizy) spowodowały znaczące poszerzenie listy zastosowań, wśród których wymienić należy: badanie składu chemicznego, kontrolę zamkniętych opakowań i pojemników, wykrywanie przesiewowe narkotyków i materiałów wybuchowych, obrazowanie medyczne, a także badania nieniszczące.



Rys. 2. Uproszczony schemat systemu terahercowego TDS pracującego w trybie odbiciowym w układzie z rozdzielaczem wiązki
Fig. 2. Simplified scheme of the terahertz time domain spectroscopy working in reflection mode in configuration with beam splitter

Ze względu na zakres częstotliwości promieniowanie terahercowe wykazuje szereg specyficznych właściwości:

- propaguje się w sposób podobny jak światło;
- przenika przez różne materiały, w zakresie podobnym jak fale radiowe, a więc przechodzi przez różnego rodzaju materiały nieprzewodzące jak tworzywa sztuczne, papier, ceramika, itp.; umożliwia to badania struktury wewnętrznej elementów wykonanych z tego typu materiałów;
- przechodząc przez niektóre substancje wchodzi w interakcję z molekułami i przez to fale o określonych częstotliwościach są silniej absorbowane co umożliwia identyfikację składu chemicznego badanej substancji;
- jest silnie absorbowane przez wodę i parę wodną;

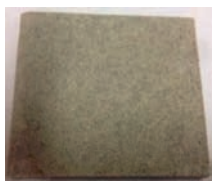


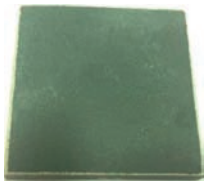



Rys. 3. Uproszczony schemat systemu terahercowego TDS pracującego w trybie odbiciowym w układzie z niezależnymi głowicami
Fig. 3. Simplified scheme of the terahertz time domain spectroscopy working in reflection mode in configuration with independent heads

Technologia terahercowa w badaniach nieniszczących wykorzystywana jest do oceny stanu różnych struktur nieprzewodzących m.in. kompozytów dielektrycznych, powłok malarskich i materiałów ceramicznych. Teraherce pozwalają wykrywać defekty takie jak: rozwarstwienia, puste przestrzenie, braki kleju, braki żywicy, czy nierównomierności wzmocnienia.

Systemy terahercowe wykorzystywać mogą wzbudzenie falą ciągłą (CW, ang. Continuous Wave) lub impulsowe (TDS - spektroskopia w dziedzinie czasu, ang. Time Domain Spectroscopy).

Tab. 1. Podstawowe parametry badanych próbek płyt włóknisto-cementowych
Tab. 1. Basic parameters of the tested fiber-cement boards samples

Oznaczenie płyty	A	B	C	D	E
Rodzaj płyty	włóknisto-cementowa, wewnętrzna	włóknisto-cementowa, wewnętrzna, barwiona w masie	włóknisto-cementowa, zewnętrzna	włóknisto-cementowa, zewnętrzna, malowana	włóknisto-cementowa, wewnętrzna z miką
Grubość płyty [mm]	8	8	8	8	10
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	12,76	13,98	26,54	27,19	10,24
Wilgotność masowa ww [%]	5,05	4,14	2,41	1,19	6,02
Gęstość [kg/m ³]	1100	1200	1600	1650	1000
Zdjęcie płyty					

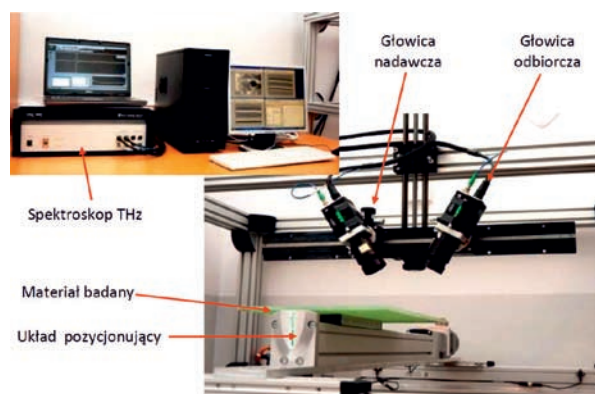
W przypadku systemów TDS niejednorodności materiału wykrywane są dzięki rejestracji fali terahercowych ulegających odbiciu od granic niejednorodności materiału, gdzie występuje zmiana własności elektrycznych i współczynnika refrakcji. Badania mogą być prowadzone w trybie: transmisyjnym (nadajnik i odbiornik znajdują się po przeciwnych stronach obiektu badanego) i odbiciowym (nadajnik i odbiornik znajdują się po tej samej stronie obiektu badanego). Bardziej precyzyjną informację o poszczególnych warstwach występujących w badanym materiale można uzyskać w trybie odbiciowym i dlatego ten tryb został wybrany w tym przypadku.

Uproszczony schemat systemu terahercowego TDS pracującego w trybie odbiciowym został przedstawiony na rys. 2. Jest to jedna z możliwych konfiguracji głowic, w której wykorzystano rozdzielacz wiązki. Drugą z konfiguracji to wariant z niezależnymi głowicami pracującymi w układzie „V” (rys. 3).

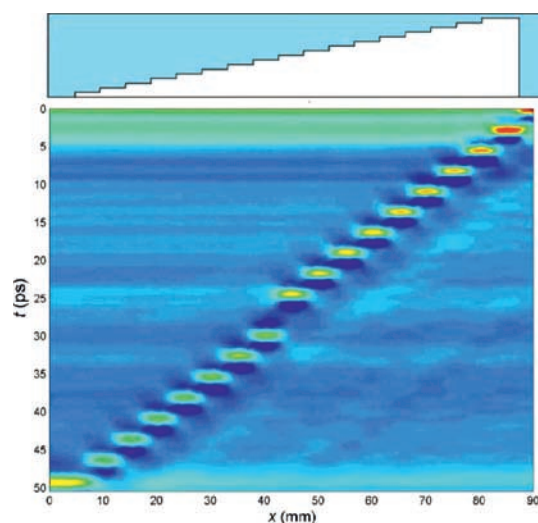
Głównymi elementami systemu terahercowego TDS są: laser femtosekundowy (generujący impulsy o czasie trwania rzędu femtosekund), optyczna linia opóźniająca oraz dwie głowice (nadawcza i odbiorcza) sprzężone z laserem poprzez światłowody. W głowicy nadawczej i odbiorczej znajdują się anteny fotoprzewodzące PCA (ang. Photoconductive Antenna). Femtosekundowe impulsy z lasera padają na antenę motylkową z przerwą fotoprzewodzącą, co powoduje krótkotrwały przepływ prądu przez ramiona anteny, a w dalszej kolejności powstanie fali elektromagnetycznej o częstotliwościach terahercowych. Wygenerowane fale są skupiane za pomocą układu optycznego na materiale badanym. Fale terahercowe przechodząc przez materiał ulegają odbiciu, stłumieniu i rozproszeniu. Impulsy odbite od kolejnych warstw materiału docierają do detektora z różnymi opóźnieniami. Sygnał elektryczny otrzymywany z detektora zawiera informację o strukturze wewnętrznej badanego materiału. W opisywanych eksperymentach wykorzystano system terahercowy TRay4000 firmy Picometrix (rys. 4). Rozdzielczość przestrzenna systemu (w płaszczyźnie x, y) ograniczona jest przez długość fali i wynosi, ok 150 μm dla częstotliwości $f = 1,5 \text{ THz}$. Rozdzielczość osiowa wynosi ok. 10-40 μm . Głębokość wnikania zależna jest od właściwości elektrycznych badanego materiału i wynosi od kilku do kilkudziesięciu milimetrów.

3. Opis badań

Badaniom poddano próbki nieuszkodzonych płyt włóknisto-cementowych o różnych właściwościach i parametrach. Zdjęcia próbek jak i ich parametry zawarto w Tabeli 1. Badaniom



Rys. 4. Zdjęcie systemu do badań nieniszczących metodą terahercową
Fig. 4. Photo of the system for terahertz inspection



Rys. 5. Widok przekroju przez fantom i sygnał zmierzony dla tego profilu w postaci B-skanu

Fig. 5.A Sectional view of the phantom and the signal measured for the profile in the form of B-scan

poddano również płytę zawierającą sztuczne defekty (rozwarstwienie i pęknięcie). Każda z badanych płyt była mocowana do układu pozycjonującego (rys. 4). Układ pozycjonujący umożliwiał przesuwanie płyt w dwóch osiach (x i y) względem nieruchomej głowicy pomiarowej. W ten sposób pozyskano dane pozwalające na zbadanie struktury materiału w całej objętości płyty. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci dwuwymiarowych wykresów przebiegów czasowych sygnałów z głowicy odbiorczej (B-skanów i/lub C-skanów). Sygnały z sytemu terahercowego mają charakter bardzo zbliżony do tych uzyskiwanych w metodzie ultradźwiękowej. W artykule zamieszczono jedynie wybrane wyniki pomiarów w celu zilustrowania możliwości zaproponowanej metody testowania.

4. Wyniki badań

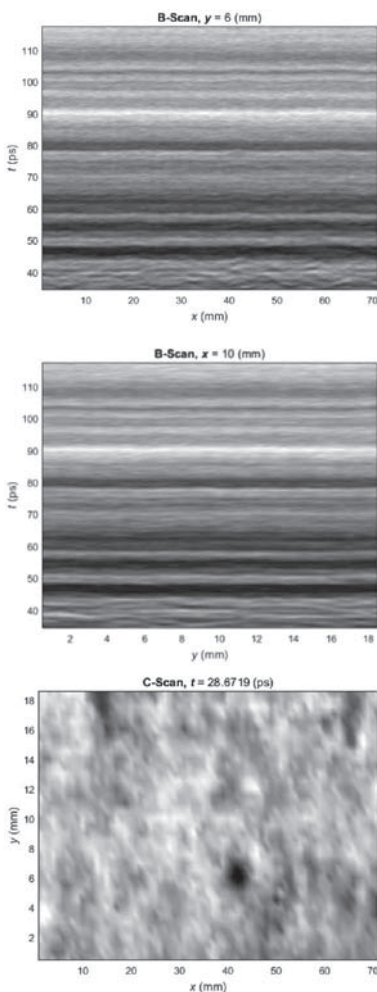
Wstępne badania zostały przeprowadzone dla zobrazowania fantomu wykonanego z plexi o grubości 5mm. W płycie wytworzono różnego typu modelowe wady. Na rys. 5 przedstawiono przekrój, na którym uwidoczniono kształt wady (schodkowe pocienienie płyty), a niżej zamieszczono wynik pomiaru w postaci B-skanu.

Na wykresie widoczne są lokalne ekstrema korespondujące z odbiciem fali od tylnej ścianki płyty. Na wykresie nie zamieszczono

fragmentu sygnału odpowiadającego odbiciu od przedniej ścianki płyty ze względu na bardzo dużą amplitudę, co spowodowałoby brak widoczności sygnałów odpowiadających odbiciom od tylnej ścianki. Pomiary przeprowadzono dla różnych konfiguracji głowic (rys. 2, rys. 3) i różnych odległości głowicy od badanego materiału. Wyniki tych eksperymentów pozwoliły na wybór położenia i konfiguracji głowic pozwalającej na uzyskanie maksymalnej rozdzielczości i czułości. Wykres przedstawiony na rys. 5 przedstawia sygnał zmierzony dla wybranej, optymalnej w sensie rozdzielczości przestrzennej, konfiguracji głowic z rozdzielaczem wiązki. Po określeniu optymalnej konfiguracji, przystąpiono do pomiarów próbek płyt włókniasto-cementowych dla których nie stwierdzono występowania defektów (próbki „A”, „E” opisane w Tabeli 1). Dla porównania zamieszczono również wyniki pomiarów dla próbki, w której wytworzono w sposób sztuczny defekty w postaci pustki i pęknięcia. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6 do rys 11.

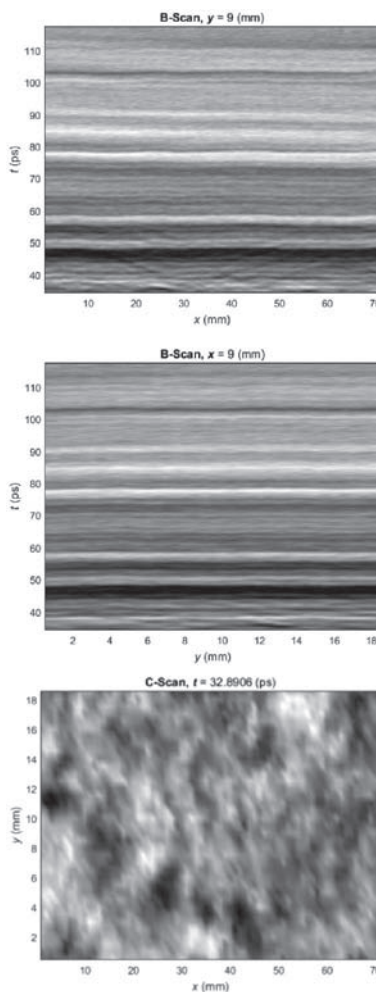
Dla każdej próbki przedstawiono:

- B – skan – zmierzony przy przemieszczaniu głowicy wzdłuż dłuższej osi próbki (x);
- B – skan – zmierzony przy przemieszczaniu głowicy wzdłuż krótszej osi próbki (y);
- C – skan – wykreślony dla wybranej chwili czasowej.



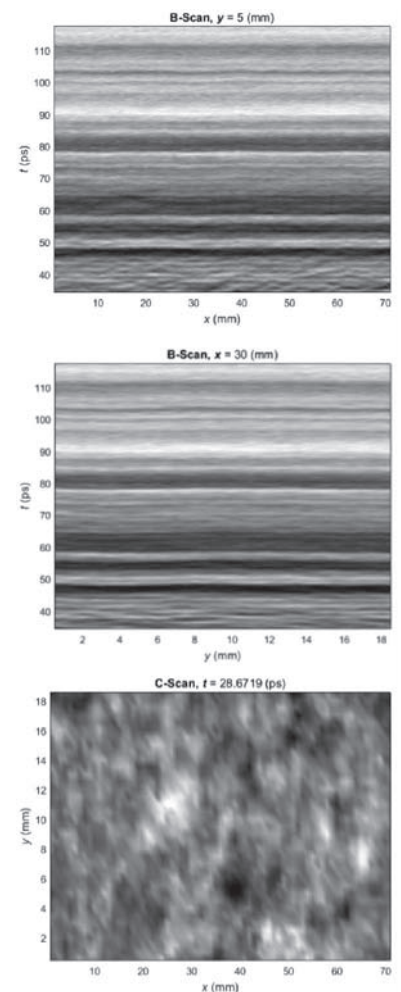
Rys. 6. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włókniasto-cementowej "A"

Fig. 6. The signals measured for a sample of fiber-cement "A"



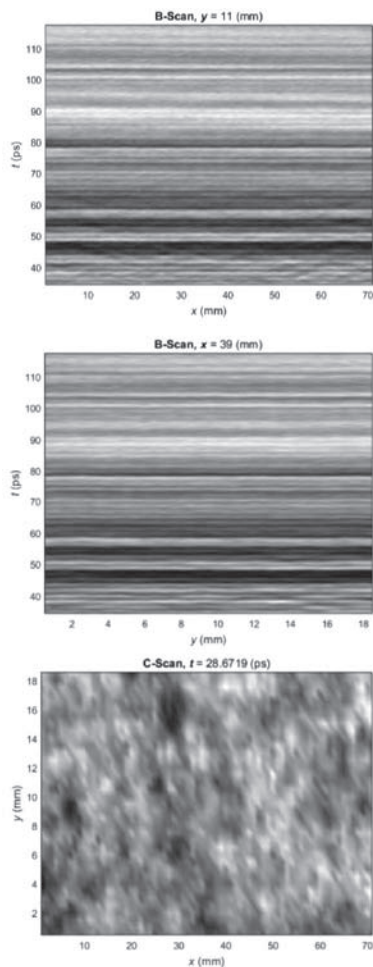
Rys. 7. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włókniasto-cementowej "B"

Fig. 7. The signals measured for a sample of fiber-cement "B"



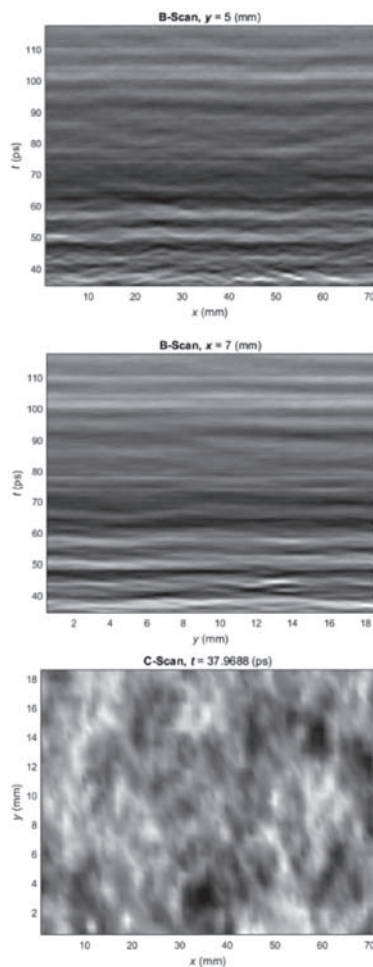
Rys. 8. Sygnały zmierzone dla próbki włókniasto-cementowej "C"

Fig. 8. The signals measured for a sample of fiber-cement "C"



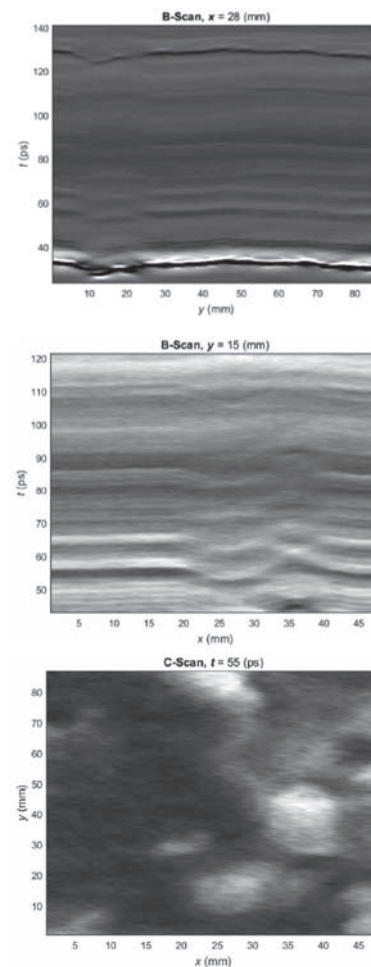
Rys. 9. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włóknisto-cementowej „D”

Fig. 9. The signals measured for a sample of fiber-cement „D”



Rys. 10. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włóknisto-cementowej „E”

Fig. 10. The signals measured for a sample of fiber-cement „E”



Rys. 11. Sygnały zmierzone dla próbki płyty włóknisto-cementowej z defektami sztucznymi

Fig. 11. The signals measured for a sample of fiber-cement z defektami sztucznymi

Wybór obrazów przeprowadzono kierując się występowaniem na nich dobrze widocznych wewnętrznych niejednorodności. Na przedstawionych obrazach zaobserwować można warstwową strukturę w przypadku wszystkich próbek. O ile w przypadku próbek „A” – „D” struktura wewnętrzna jest relatywnie regularna to w przypadku próbki „E” (rys. 10) widać dość silne zaburzenia sygnału co świadczy o występowaniu w tym przypadku niejednorodności struktury wewnętrznej i zaburzeniu układu warstw. Jednakże jeśli te zaburzenia porównamy z wynikami otrzymanymi dla próbki defektami sztucznymi (rys. 11) to łatwo zauważyć, że w przypadku próbki „E” mamy tylko niewielkie niejednorodności.

5. Podsumowanie

Mając na uwadze przedstawione wstępne wyniki pomiarów, można wysnuć wniosek, że metoda terahercowa dostarcza bardzo wiele informacji o wewnętrznej strukturze płyt włóknisto-cementowych. Mierzone sygnały powinny być przetwarzane tak aby uwypuklić wskazania potencjalnych defektów i zwiększyć rozdzielczość pomiarów. Zaletami proponowanej metody są: pomiar bezkontaktowy, dość duża szybkość pomiarów (do 10000 pomiarów typu A-skan na sekundę), duża rozdzielczość i możliwość identyfikacji warstw wewnętrznych. Poważną wadą jest natomiast relatywnie wysoki koszt aparatury pomiarowej,

choć w ostatnich latach można zaobserwować gwałtowny spadek cen i coraz większe grono producentów oferujących tego typu urządzenia.

6. Literatura

- [1] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, „Badania płyt włóknisto-cementowych zawierających materiały z recyklingu” *Materiały Budowlane*, nr 10, s. 27-29, 2015.
- [2] T. Gorzelańczyk, K. Schabowicz, „Rewitalizacja elewacji budynków z zastosowaniem płyt włóknisto-cementowych” *Materiały Budowlane*, nr 11, s. 163-165, 2015.
- [3] PN-EN 12467:2013-03E - Płyty płaskie włóknisto-cementowe. Charakterystyka wyrobu i metody badań.
- [4] Z. Ranachowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, A.M. Brandt, T. Dębowski, “Application of Acoustic Emission Method to Determine Critical Stress in Fibre Reinforced Mortar Beams” *Archives of Acoustics*, Vol.37, Nr 3, s.261-268, 2012.
- [5] K. Schabowicz, Z. Ranachowski, D. Józwiak-Niedźwiedzka, Ł. Radzik, Jr. S. Kudela, T. Dvorak, “Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards” *Construction and Building Materials*, Vol. 110, s.182-188, 2016.
- [6] 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 (2005). 570-577.