

*Andrzej Staniek**

**METODA OCENY
JAKOŚCI WKLEJENIA ŻERDZI KOTWIOWYCH W GÓROTWORZE
JAKO SKUTECZNY SPOSÓB KONTROLI
STANU BEZPIECZEŃSTWA PRACY
W WYROBISKACH KORYTARZOWYCH**

1. Wstęp

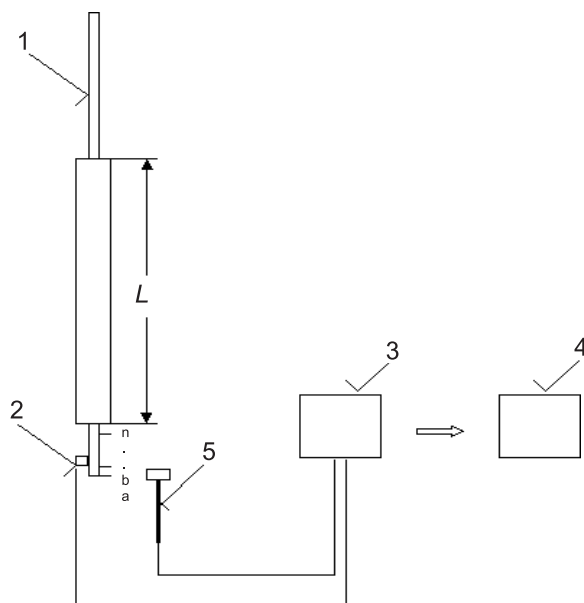
Obudowa kotwiowa pełni swoją funkcję prawidłowo wtedy, gdy kotwie wklejone są do górotworu na długości zamierzonej przez projektanta (zakłada się poprawność projektu). Niestety nie można tego stwierdzić dotychczas stosowanymi metodami. Potrzebnym więc było opracowanie nieniszczącej metody oceny jakości wklejenia kotwi z podaniem odcinków nieciągłości. Celem weryfikacji metody przeprowadzono badania zarówno w Kopalni Doświadczalnej Barbara GIG, jak i zakładach górniczych węgla kamiennego i rud miedzi. Badania prowadzono dla przypadków gdzie rozmieszczenie odcinków nieciągłości wklejenia żerdzi kotwiowych: znane było przed wykonaniem badań, zostało udostępnione dopiero po wykonaniu badań, jakość wklejenia żerdzi nieznana była zarówno wykonującemu badania jak i dozorowi górniczemu. W artykule przedstawiono przykłady prowadzonych badań, wyniki oraz wnioski.

2. Opis metody

Metoda identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwiowych w górotworze [7] realizowana jest w oparciu o wymuszenie drgań badanego obiektu z wykorzystaniem młotka udarowego wyposażonego w przetwornik siły w głowicy młotka oraz równoczesną rejestrację

* Główny Instytut Górnictwa, Katowice

sygnału wymuszenia, pochodzącego z przetwornika siły i sygnału odpowiedzi na to wymuszenie, pochodzącego z piezoelektrycznego przetwornika drgań. Kierunek wymuszenia i oś główna przetwornika odbiorczego są prostopadłe do osi symetrii żerdzi. Wymuszenie odbywa się dla kilku punktów rozmieszczonych na wystającym z górotworu odcinku żerdzi kotwiowej przy ustalonym położeniu przetwornika odbiorczego. Rejestrację sygnałów prowadzi się sekwencyjnie dla par punktów pomiarowych. Dane zapisywane są w postaci plików w formacie UF (*universal file*). Po wykonaniu pomiarów dane eksportowane są do programu realizującego analizę modalną [1–4] w celu identyfikacji odpowiednich częstości własnych badanego obiektu, charakterystycznych dla danego rodzaju nieciągłości wklejenia. Otrzymane częstości własne porównywane są z wynikami teoretycznej analizy modalnej [5, 6] realizowanej na modelu elementów skończonych badanego obiektu, dla różnych warunków brzegowych, odpowiadających różnym przypadkom nieciągłości wklejenia. Układ pomiarowy stosowany w metodzie przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ pomiarowy: 1 — żerdź kotwiowa, 2 — przetwornik drgań, 3 — system pomiarowy, 4 — stacja robocza dla analizy modalnej, 5 — młotek uderowy, 6 — powierzchnia stropu, a–n punkty wymuszenia, L — długość wklejenia

Praktyczną realizację systemu pomiarowego w części dotyczącej akwizycji i rejestracji danych pomiarowych w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej prezentują rysunki 2 i 3.

Zasadniczymi zaletami metody są: możliwość oceny ciągłości wklejenia w dowolnym momencie po zabudowaniu kotwi, nieniszczący charakter metody, brak konieczności instalacji oprzyrządowania w górotworze, co wpływa na szybkość wykonywanych pomiarów.



Rys. 2. Przenośny system pomiarowy, realizacja badań w warunkach rzeczywistych stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej



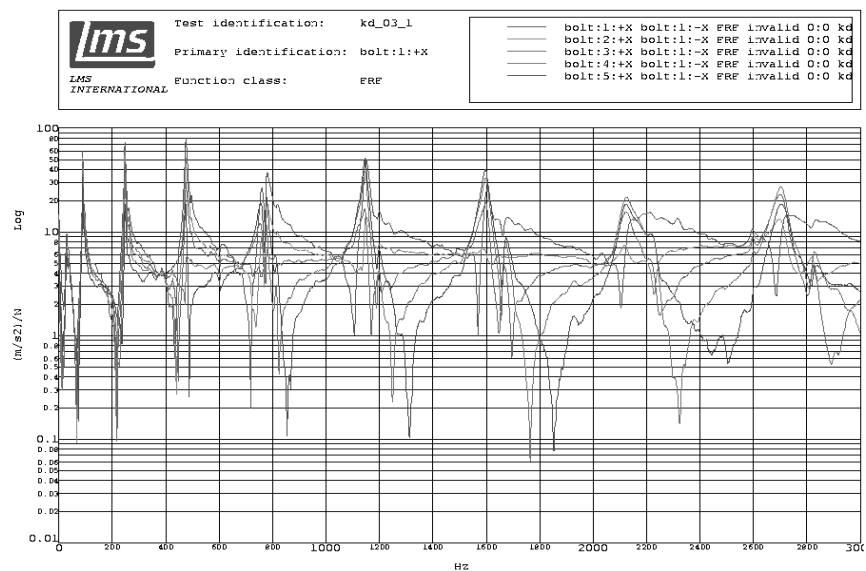
Rys. 3. Wymuszanie drgań młotkiem udarowym, sygnał odpowiedzi mierzony piezoelektrycznym przetwornikiem drgań

3. Realizacja badań

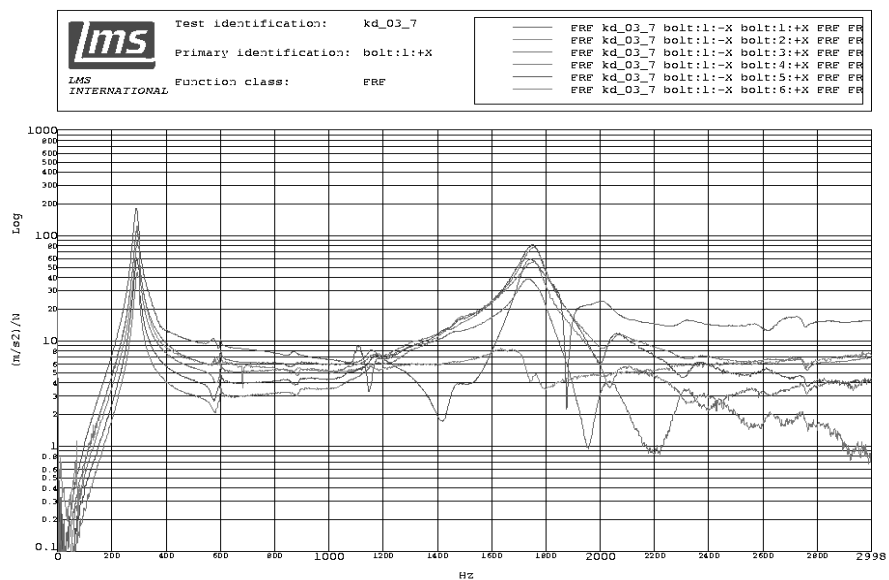
3.1. Badania w KD Barbara GIG

Ważnym elementem sprawdzenia poprawności metody były badania przeprowadzone w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” w Mikołowie, gdzie przedmiotem badań były kotwie wklejane w sposób kontrolowany (znana długość nieciągłości wklejenia). Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykłady wyników prowadzonych badań — charakterystyki funkcji przejścia (*frequency response function* — *FRF*) dla dwóch skrajnych przypadków.

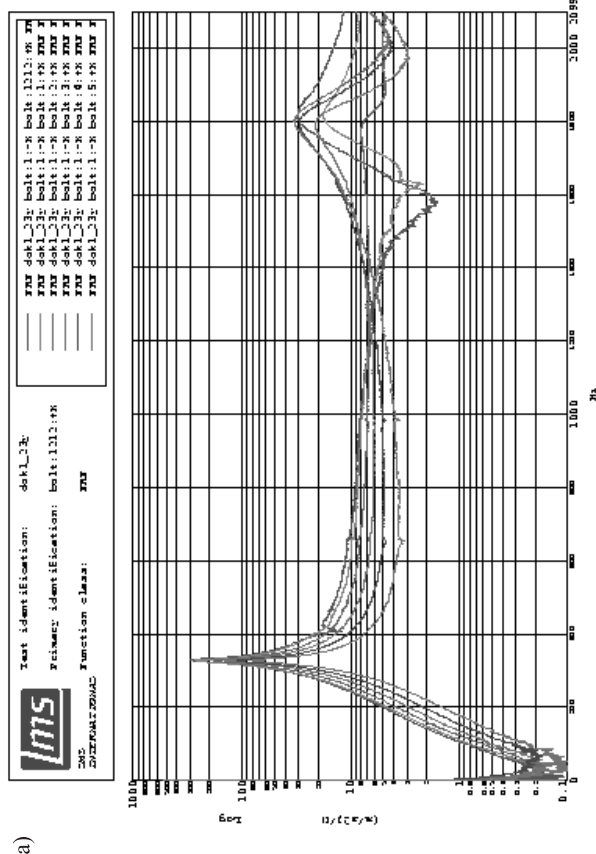
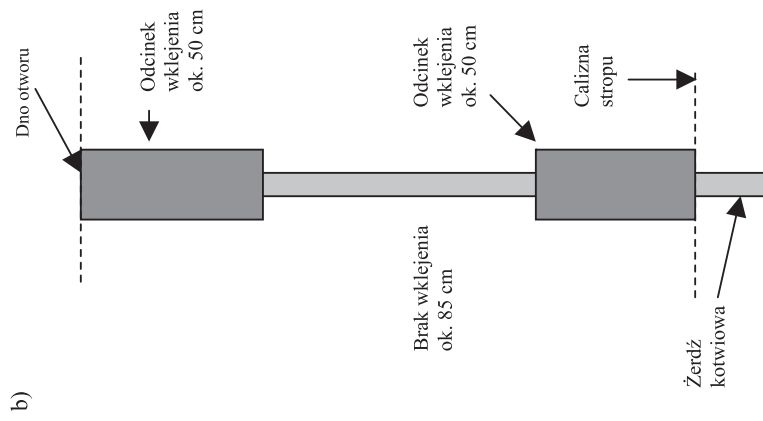
Kolejnym eksperymentem było sprawdzenie, czy metoda pozwala na identyfikację odcinków nieciągłości, które zlokalizowane są pomiędzy odcinkami wklejenia. Poniżej na rysunkach 6 i 7 oraz w tabelach 1 i 2 przedstawiono wyniki analiz oraz uzyskane w wyniku zastosowanej metody odcinki nieciągłości wklejenia dla wybranych przypadków.



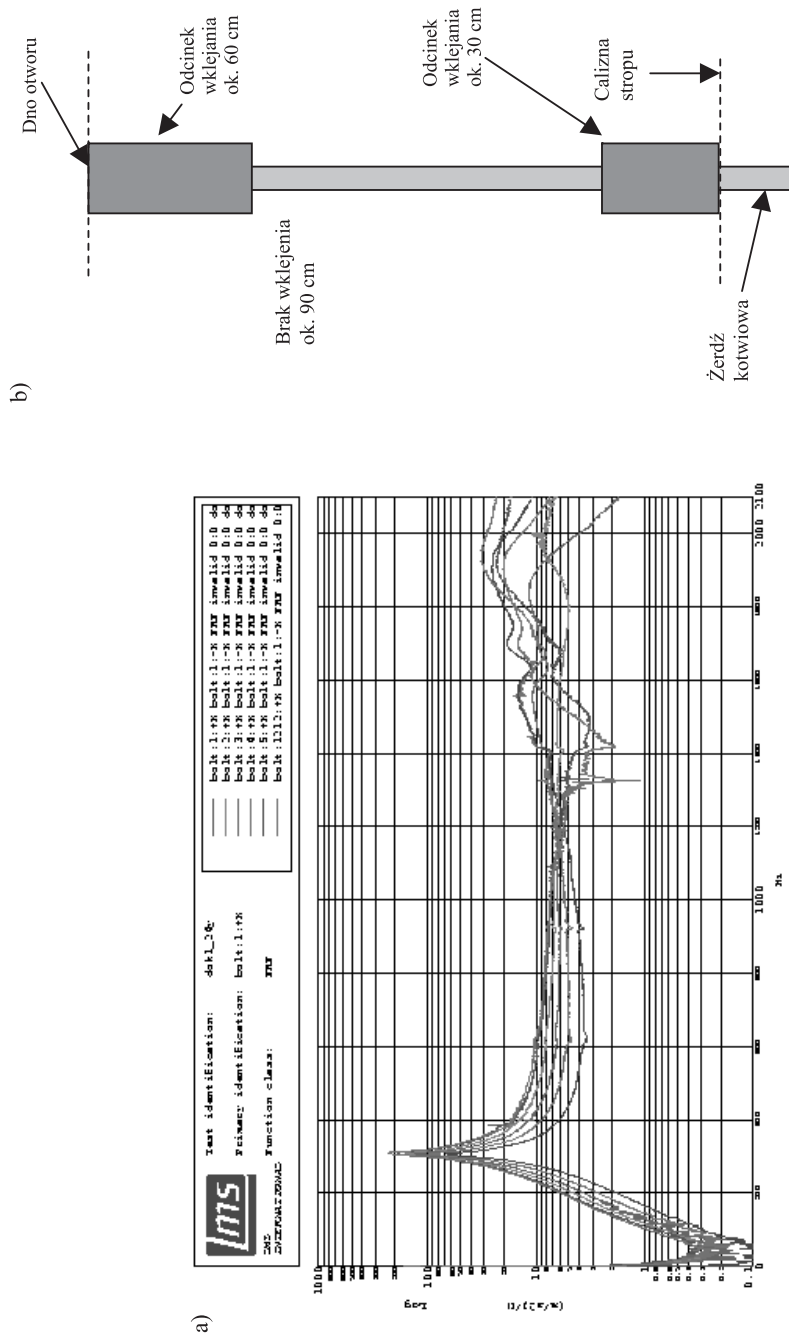
Rys. 4. Charakterystyki funkcji przejścia dla poszczególnych punktów wymuszenia drgań dla przypadku wklejenia 1/2 długości żerdzi od strony ociosu; oś pionowa: inertancja, w m/s²/N, oś pozioma częstotliwość, Hz



Rys. 5. Charakterystyki funkcji przejścia dla poszczególnych punktów wymuszenia dla przypadku wklejenia 1/2 długości żerdzi od dna otworu; oś pionowa: inertancja, w m/s²/N, oś pozioma częstotliwość, Hz



Rys. 6. Charakterystyki funkcji przejścia dla analizowanego przypadku (a) oraz wyznaczone odcinki wklejenia żerdzi kotwionej w górotworze (b), przy długość żerdzi równej 2 m. Oznaczenie osi wykresu: — inercyjacja, w $m/s^2/N$, os pozioma — częstotliwość, Hz



Rys. 7. Charakterystyki funkcji przejścia dla analizowanego przypadku (a) oraz wyznaczone odcinki wklejenia żerdzi kotwionej w górotworze (b), długość żerdzi wynosi 2 m, oznaczenia osi wykresu: inercyjność, w $m/s^2/N$, os pozioma częstotliwość, Hz

TABELA 1
**Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych
 badanej żerdzi kotwiowej**

Lp.	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
1	327,8	1,1
2	653,6	1,3
3	978,3	1,0
4	1634,9	0,6
5	1817,3	2,7

TABELA 2
**Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych
 badanej żerdzi kotwiowej**

Lp.	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
1	286,7	1, 6
2	571,0	1,5
3	859,5	0,4
4	1408,6	0,7
5	1493,5	3,5
6	1699,4	0,9

Wyniki badań wykazały zgodność położenia odcinków nieciągłości: zamodelowanych i stwierdzonych w wyniku analiz.

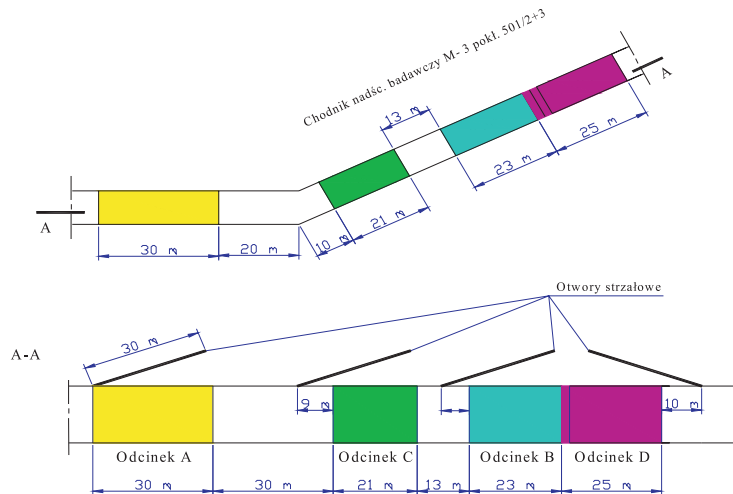
3.2. Badania w zakładach górniczych węgla kamiennego

Badania jakości wklejenia żerdzi kotwiowych w górotworze, w którym rejestruje się silne zjawiska sejsmiczne [8] przeprowadzono w chodniku doświadczalnym (rys. 8).

Zjawiska sejsmiczne uzyskano poprzez odpalenie ładunków MW. W otworach strzałowych o długości 30 m odwiercanych pod kątem ok. 30° do powierzchni stropu przeprowadzono serię strzelań. Masa ładunków MW wynosiła odpowiednio: odcinek A — 30 kg, odcinek B — 66 kg, odcinek C — 60 kg, odcinek D — 60 kg.

Badania wklejenia przeprowadzono przed i po detonacji ładunków MW.

W założeniu obudowa kotwiowa miała być wklejona w sposób ciągły (na całej długości wszystkich kotwi).



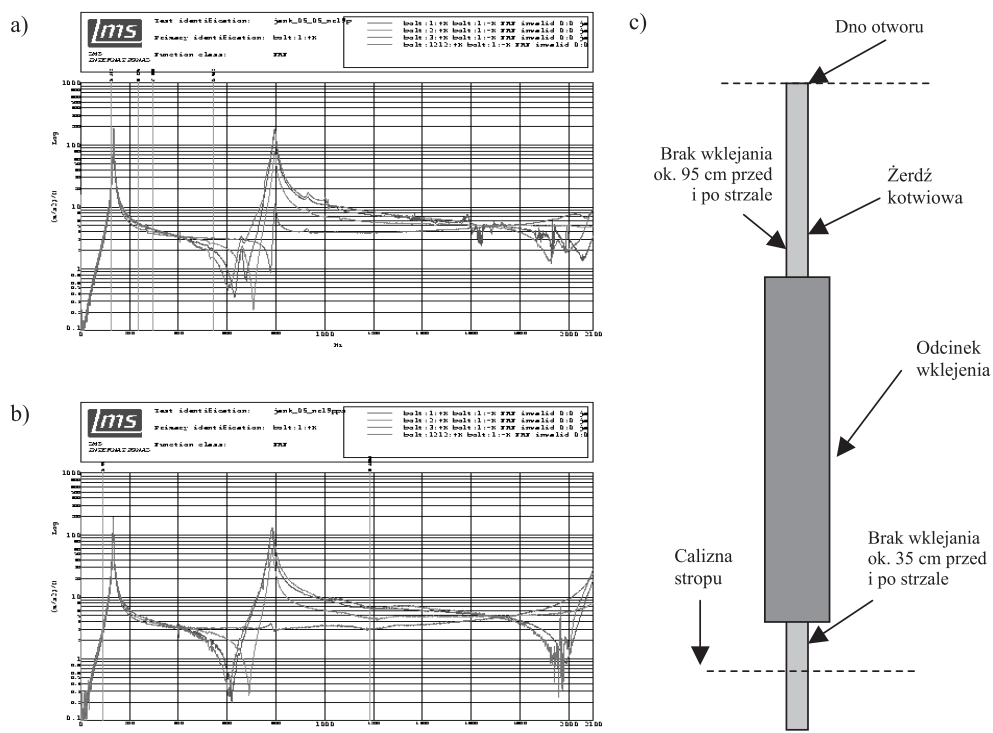
Rys. 8. Schemat rozmieszczenia odcinków doświadczalnych w chodniku badawczym:
 odcinek A: obudowa łukowa; odcinek B: Samodzielna obudowa kotwiowa;
 odcinek C: obudowa łukowa wzmocniona kotwiami i siatką wstrząsoodporną; odcinek D:
 samodzielna obudowa kotwiowa wzmocniona kotwiami podatnymi i siatką wstrząsoodporną

Miejsca detonacji MW zlokalizowane były w odległości od 5 do 12 m od końców wklejonych do stropu żerdzi. Według ocen specjalistów [9] naturalne ogniska wstrząsów zlokalizowane są w większości przypadków w odległościach 50÷500 m od wyrobiska. Prowadzone badania dostarczyły więc cennych informacji, dotyczących obudowy kotwiowej i jej zachowania, w sytuacji, gdy ognisko wstrząsu zlokalizowane jest w bliskiej odległości od stropu.

W wyniku badań przeprowadzonych na 18 wybranych losowo kotwiach stwierdzono, że:

- 1) dla 10 przypadków nie stwierdzono znaczącego pogorszenia się jakości wklejenia żerdzi kotwiowych (zmiany długości wklejenia nie przekraczające 5 cm),
- 2) dla 4 przypadków stwierdzono deformację żerdzi, prawdopodobnie spowodowaną przesunięciem warstw skalnych,
- 3) dla jednego przypadku detonacja ładunków spowodowała większe zakleszczenie żerdzi w skale (na odcinku, na którym przed strzelaniem stwierdzono brak wklejenia),
- 4) dla 3 przypadków wystąpiły problemy z interpretacją wyników, w szczególności z badań dla stanu po strzelaniu.

Na rysunkach 9 i 10 oraz w tabelach 3 i 4 przedstawiono wyniki analizy dla 2 wybranych przypadków. Na wykresach zamieszczono charakterystyki funkcji przejścia rejestrowanej przy wymuszeniu drgań w kolejnych punktach pomiarowych, rozmieszczonych na wystającym z górotworu odcinku żerdzi, przed i po detonacji ładunków wybuchowych. Na podstawie tych charakterystyk, wyznaczane były częstotliwości drgań własnych układu mechanicznego: wklejona żerdź – górotwór. Rodzaje stwierdzonych nieciągłości wklejenia przedstawiono graficznie.



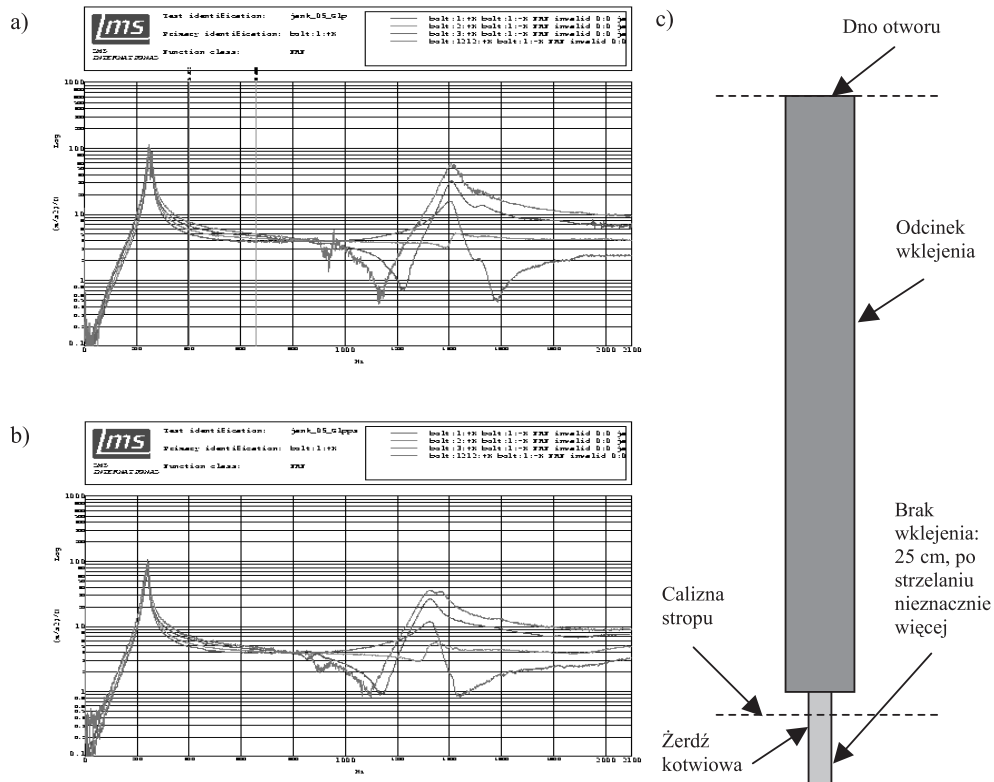
Rys. 9. Charakterystyki funkcji przejścia dla analizowanego nieznanego przypadku. Eksperyment wpływu strzelania w wyrobisku: a) przed strzelaniem; b) po strzelaniu; c) wyznaczone odcinki wklejania żerdzi kotwiowej w górotworze przy długość żerdzi równej 2,3 m; oznaczenie osi wykresu: oś pionowa — inercyjność, w $m/s^2/N$, oś pozioma — częstotliwość, Hz

TABELA 3

Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych badanej żerdzi kotwiowej

Lp.	Przed strzelaniem	⇒	Po strzelaniu
	częstotliwość, Hz		częstotliwość, Hz
1	134,7	⇒	133,2
2	269,2	⇒	269,9
3	658,5	⇒	647,5
4	794,1	⇒	785
5	928,4	⇒	1011,4

W tym przypadku wklejenie nie było pełne natomiast nie stwierdzono zmian po strzelaniu.



Rys. 10. Charakterystyki funkcji przejścia dla analizowanego nieznanego przypadku. Eksperyment wpływu strzelania w wyrobisku: a) przed strzelaniem; b) po strzelaniu; c) wyznaczone odcinki wklejenia żerdzi kotwiowej w górotworze przy długości żerdzi równej 1,8 m; oznaczenie osi wykresu: oś pionowa — inercyjność, w $m/s^2/N$, oś pozioma — częstotliwość, Hz

TABELA 4

Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych badanej żerdzi kotwiowej

Lp.	Przed strzelaniem	⇒	Po strzelaniu
	częstotliwość, Hz		częstotliwość, Hz
1	247,8	⇒	232,1
2	1406,9	⇒	1319,6
3	—	⇒	1576,5

W tym przypadku po strzelaniu stwierdzono nieznaczne ukruszenie spoiwa w dolnej części żerdzi kotwiowej.

3.3. Badania w zakładach górniczych rud miedzi

Przeprowadzone badania miały na celu sprawdzenie możliwości stosowania metody identyfikacji ciągłości wklejenia żerdzi kotwionych w górotworze, w zastosowaniu do obudowy kotwionej wykorzystywanej w KGHM Polska Miedź SA. Badania prowadzono na przygotowanych wcześniej przypadkach nieciągłości wklejenia, nieznanymi osobie wykonującej badania.

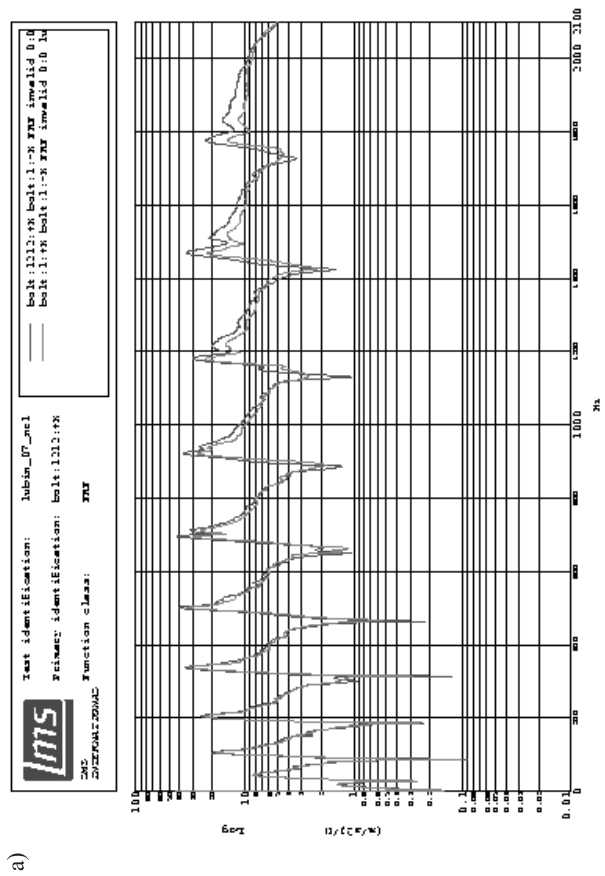
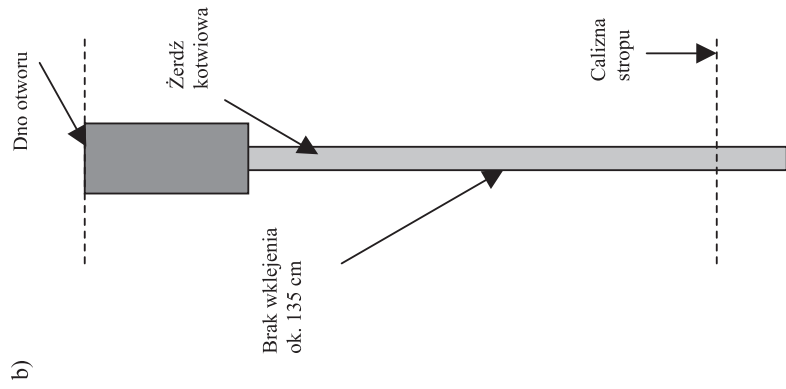
Na rysunkach 11–13 oraz w tabelach 5 i 6 przedstawiono wyniki analizy dla 2 wybranych badanych przypadków (z przygotowanych w sposób kontrolowany 10 przypadków nieciągłości wklejenia). Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych badanej żerdzi kotwionej zestawiono w tabeli 7.

TABELA 5
Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych badanej żerdzi kotwionej

Lp.	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
1	43,8	13,4
2	105,3	3,7
3	205,2	2,4
4	337,6	1,9
5	500,2	0,8
6	693,7	0,7
7	919,7	1,1
8	1178,9	0,4
9	1468,6	0,6
10	1772,7	0,7

TABELA 6
Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych badanej żerdzi kotwionej

L.p.	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
1	145,2	4,2
2	314,4	2,7
3	568,1	2,9
4	902,9	2,9
5	1290,6	0,6



Rys. 11. Charakterystyki funkcji przejścia dla analizowanego przypadku (a) oraz wyznaczone odcinki wklejenia żerdzi kotwiovej w górotworze (b), przy długość żerdzi równej 1,8 m; oznaczenie osi wykresu: os pionowa — inercyjność, w $m/s^2/N$, os pozioma częstotliwość, Hz

TABELA 7
Częstotliwości zidentyfikowanych drgań własnych
badanej żerdzi kotwiowej

Lp.	Częstotliwość, Hz	Tłumienie, %
1	54,0	1,4
2	336,7	0,7
3	929,2	0,7
4	1834,7	0,9

Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły na identyfikację odcinków nieciągłości i potwierdziły możliwość stosowania metody w wyrobiskach korytarzowych zakładów górniczych rud miedzi.

4. Wnioski

Wzrost zainteresowania stosowaniem obudowy kotwiowej w przemyśle górniczym wiąże się z efektami ekonomicznymi. Zabezpieczanie wyrobiska taką obudową wymaga mniejszego nakładu czasu oraz materiałów, jest również technicznie dogodniejsze od innych sposobów zabezpieczenia. W górotworze charakteryzującym się mocnymi stropami — USA, RPA, Australia — obudowa kotwiowa stosowana jest powszechnie. W Polsce, w górnictwie węglowym, według prowadzonych analiz [11], warunki techniczne umożliwiają na stosowanie tego rodzaju zabezpieczenia wyrobiska na znacznie większym obszarze, natomiast w górnictwie rud miedzi obudowa kotwiowa jest podstawowym sposobem zabezpieczenia wyrobisk. Równocześnie na rynku usług obserwuje się brak nieniszczących metod badania poprawności zamocowania obudowy kotwiowej (żerdzi kotwiowych). Nad tymi zagadnieniami pracują również inne ośrodki [12], jednakże dotychczas opracowane metody nie dostarczają dostatecznie pewnych wyników, dlatego też podjęto pracę nad nieniszczącą metodą badania jakości wklejenia żerdzi kotwiowych z wykorzystaniem nowoczesnych algorytmów przetwarzania sygnałów drganiowych.

Uzyskane wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że opracowana metoda może być stosowana dla różnych rodzajów skał, zarówno w zakładach górniczych węgla kamiennego, jak i rud miedzi.

Metoda umożliwia identyfikację odcinków nieciągłości wklejenia, co ma istotne znaczenie dla oceny prawidłowego zabezpieczenia wyrobisk korytarzowych.

LITERATURA

- [1] *Ewins D.J.*: Modal Testing: theory, practice and application. Letchworth, Herts, Research Studies Press Ltd. 2000
- [2] *Maia N.M.M., Silva J.M.M.*: Theoretical and Experimental Modal Analysis. 1997

- [3] *Remington P.J.*: Experimental and theoretical studies of vibrating systems. Encyclopedia of Acoustics, 2, John Wiley & Sons 1997
- [4] *Uhl T.*: Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, 1997
- [5] *Byron F.W., Fuller R.W.*: Matematyka w fizyce klasycznej i kwantowej. Warszawa, PWN 1975
- [6] *Bochniak W., Uhl T., Lisowski W.*: Problemy dostrajania modeli elementów skończonych. AGH 1999
- [7] *Staniek A.*: Method for identification of grouting continuity of rock bolts. Archives of Mining Sciences, 50, 3, 2005
- [8] *Kidybiński A., Nierobisz A., Masny W.*: Utrzymanie wyrobiska przy wymuszonym wstrząsie stropu bezpośredniego. Tapania, 2005, 41
- [9] *Patyńska R.*: Baza danych o tapaniach za lata 1991–2004. Praca statutowa GIG (praca niepublikowana)
- [10] *Brandt S.*: Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych doświadczalnych. PWN 1974
- [11] *Gawryś J.*: Analiza własności stropów pokładów węgla GZW pod kątem możliwości stosowania w wyrobiskach korytarzowych samodzielnej obudowy kotwowej. Praca doktorska, 2004
- [12] *Beard M.D., Lowe M.J.S.*: Non-destructive testing of rock bolts using ultrasonic waves. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2003