



Zastosowanie monitoringu tensometryczno-parasejsmicznego w pomiarach wpływów dynamicznych wzbudzonych detonacją materiału wybuchowego

Application of combine stress and ground borne vibration monitoring system for measurements of dynamic impacts induced by explosives detonation

Dr inż. Andrzej Biessikowski*)

Treść: W pracy przedstawiono zastosowanie spójnego systemu parasejsmiczno-tensometrycznego do pomiaru wpływów dynamicznych wzbudzanych robotami strzałowymi w zakresie niższych wartości częstotliwości. Przedstawiono opracowaną metodykę pomiaru oraz uzyskane przebiegi drgań i naprężeń w warunkach laboratoryjnych. Na podstawie analiz Matching Pursuit (MP) przeprowadzono badania struktury czasowo-częstotliwościowej, których celem było określenie czasów występowania PPV, maksymalnego naprężenia chwilowego oraz uzyskanych wartości energii dla każdej ze składowych. Na podstawie uzyskanych wyników zaobserwowano zależność pomiędzy przebiegami prędkości drgań a wyznaczonymi naprężeniami w całej dziedzinie czasu. Ponadto, otrzymane rezultaty dla analiz czasowo-częstotliwościowych przeprowadzonych na podstawie zarejestrowanych wartości drgań oraz odkształceń wzbudzonych detonacją materiału wybuchowego w skali laboratoryjnej potwierdziły bezpośrednią zależność pomiędzy PPV a maksymalnymi naprężeniami chwilowymi na każdej ze składowych.

Abstract: This paper presents the combine ground borne vibration and stress analysis measurement system. The methodology and results of the research were included. A detailed analysis in the time-frequency domain was obtained by the Matching Pursuit (MP) analysis. The MP methodology allowed to determine the occurrence of PPV and the maximum stress energy in time domain on each axis. Based on the obtained results the relation between ground – borne vibration velocity and induced stress in the concrete structure was observed in the whole time domain. Furthermore, the results of the analysis in the time – frequency domain obtained from the measured ground – borne vibration velocity and strains which were induced by blasting works on a laboratory scale, confirmed the direct relation between PPV and maximum stress at each axis.

Słowa kluczowe:

drgania parasejsmiczne, tensometria elektrooporowa, roboty strzałowe

Key words:

ground borne vibration, strain gauge, blasting works

1. Wstęp

W wyniku wykonywania robót strzałowych w odkrywkowych zakładach górniczych, ok. 20 ÷ 30% uzyskanej z procesu detonacji energii jest wykorzystywane na urabianie calizny skalnej (Pyra 2008). Pozostała część, dysypowana jest do otoczenia pod postacią oddziaływania parasejsmicznego, powietrznej fali uderzeniowej, przechodzącej w falę akustyczną oraz rozrzutu odłamków skalnych. Uwzględniając, że w otoczeniu kopalń odkrywkowych znajdują się obiekty budowlane, intensywność wzbudzanych wpływów dynamicznych może mieć istotny wpływ na stan ich konstrukcji.

Drgania parasejsmiczne wzbudzone robotami strzałowymi prowadzą do wygenerowania naprężeń w elementach konstrukcyjnych obiektu. Powstałe naprężenia początkowo pogłębiają niedoskonałości struktury wewnętrznej materiału - powodując jego mikropęknięcia, a dopiero po przekroczeniu granicy sprężystości wywołują jego pęknięcie i zniszczenie (uszkodzenie elementów konstrukcyjnych oraz wykończeniowych).

Celem minimalizacji potencjalnie szkodliwych oddziaływań oraz zapewnienia niezbędnego komfortu mieszkańcom konieczne staje się prowadzenie odpowiedniej działalności profilaktycznej, m.in. oceny oddziaływania polegającej na

naniesieniu maksymalnych wartości mierzonego parametru na odpowiedni monogram. Należy jednak zauważyć, że większość krajów posiada indywidualne wytyczne odnośnie: sposobu prowadzenia pomiaru maksymalnych dopuszczalnych wartości prędkości drgań, jak również wykorzystywanych metod i sposobów prowadzenia oceny oddziaływania. Z powyższego względu poszukuje się alternatywnych, bardziej użytecznych możliwości oceny, m.in. poprzez korelację prędkości drgań z występującym naprężeniem (Muller i in. 1998). Pomiar taki można prowadzić z wykorzystaniem spójnego systemu tensometryczno-parasejsmicznego.

Pomiary tensometryczne mają obecnie szerokie zastosowanie. Costa oraz Figueiras (2012) określali wpływ naprężeń na stalowe mosty kolejowe. Ma, Hao i Zhou (1998) badali efekt oddziaływania robót strzałowych prowadzonych w kopalniach podziemnych na obiekty budowlane oraz ruchy ziemi. Cai, Peng, Ma i Jianga (2009) proponowali zastosowanie sieci monitoringu tensometrycznego do przewidywania trzęsień ziemi, zaś Kaczor (2002) prowadziła obserwacje zmian zachodzących w górotworze podczas deformacji za pomocą metody tensometrii elektrooporowej.

W literaturze można się również spotkać z zagadnieniem dotyczącym prowadzenia spójnego monitoringu tensometryczno-parasejsmicznego (Bozdog i in. 2006). W wymienionej pracy identyfikowano przyczyny (źródła drgań) występujących uszkodzeń na konstrukcji mostowej „The New Galata

*) AGH – Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków

Bridge” oraz zaproponowano zastosowanie najbardziej efektywnej działalności profilaktycznej.

2. Część doświadczalna

Pomiary przeprowadzono w skali laboratoryjnej na terenie Centralnego Laboratorium Techniki Strzelniczej i Materiałów Wybuchowych (CLTiMW) w Regulicach. Celem pomiarów było opracowanie metodyki pomiarowej oraz uzyskanie przykładowych charakterystyk rejestrowanych drgań oraz odkształceń. Dodatkowo za pomocą metody *Matching Pursuit* (MP) przeprowadzono dokładną analizę struktury czasowo-częstotliwościowej sygnału.

2.1. Charakterystyka obiektu budowlanego

Wybrany budynek na terenie CLTiMW jest zwartym obiektem murowym, o dobrym stanie technicznym, bez podpiwniczenia. Złożony jest z dwóch części. Pierwszą część budynku (część doświadczalna) stanowi bryła betonowa z centrycznie wykonanym otworem o średnicy ok. 2 m. Druga część obiektu (część aparaturowa), ze względu na konstrukcję zbliżona jest do typowych obiektów mieszkalnych typu SWD-I. Opisany obiekt budowlany przedstawiono na rys. 1.

2.2. Metodyka pomiaru

W związku z brakiem normatywnych wytycznych odnośnie przygotowania powierzchni przed wykonaniem pomiaru, wykorzystano ogólnodostępne informacje dotyczące materiałów budowlanych (elementów niejednorodnych) oraz elementów stalowych (Vishay ... 2010a 2010b, Źródło internetowe 16, 17).

Po uprzednim usunięciu warstwy izolacyjnej budynku, na wyrównanej i oczyszczonej powierzchni naklejono czujniki tensometryczne przy użyciu kleju dwuskładnikowego.

Dokładny opis zastosowanej metodyki pomiaru przedstawiono w publikacji (Biessikirski 2014, 2016).

Aby zapewnić kompensację warunków atmosferycznych, naklejono tensometry pasywne na element o podobnych właściwościach co badany materiał budowlany. Element badawczy z przyklejonymi tensometrami przedstawiono na rys. 2.

Tensometry pomiarowe przyklejono według opisanej metodyki w narożu obiektu budowlanego. Geofony pomiarowe zainstalowano na ścianach nośnych oraz na gruncie znajdującym się w otoczeniu obiektu budowlanego. Pojedyncze otwory oraz serie otworów znajdowały się w odległości 15 m



Rys. 2. Powierzchnia przygotowana do badań z przyklejonymi tensometrami

Fig 2. Test stand with strain gauges

od budynku. Ze względu na sposób rozchodzenia się oddziaływania tensometry kompensacyjne naklejono na materiale budowlany o podobnej charakterystyce, umieszczonym na podłożu piaskowym, dodatkowo wyizolowanym matami gumowymi. Opiswane stanowisko pomiarowe przedstawiono schematycznie na rys. 3

2.3. Charakterystyka źródła drgań

Oddziaływanie parasejsmiczne wzbudzone było poprzez: odpalenie pojedynczych ładunków MW przy zastosowaniu zapalników elektrycznych oraz serii ładunków MW przy zastosowaniu zapalników nieelektrycznych.

W przypadku pojedynczych ładunków, detonowano naboje Saleterolu 8 o masie 1,65 kg, wraz z pobudzaczem trotylowym (T-50) o masie 50 g, w otworze strzałowym o głębokości 1,3 m - rys. 4. Otwór strzałowy znajdował się w odległości ok. 15 m od obiektu budowlanego.

a)

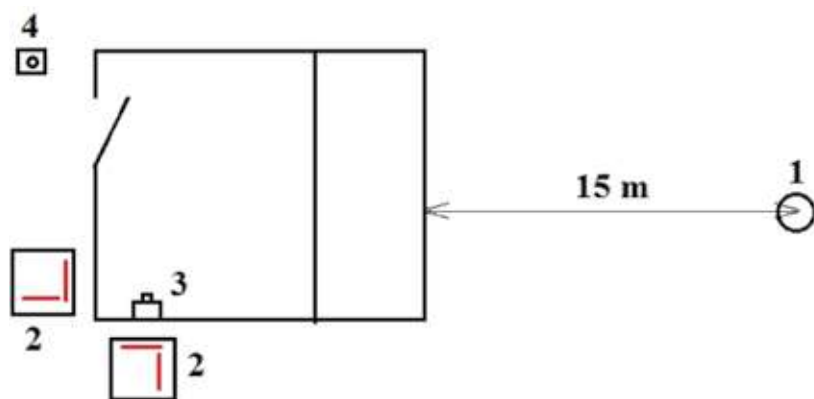


b)



Rys. 1. Zdjęcie obiektu doświadczalnego a) rzut z boku b) rzut od przodu

Fig 1. Test stand a) side view b) front view



1 - otwór strzałowy; 2 - tensometry kompensacyjne przyklejone do płyt; 3 - czujnik drgań parasejsmicznych zamontowany na ścianie obiektu budowlanego; 4 - czujnik drgań parasejsmicznych zamontowany na gruncie

Rys. 3. Szkic sytuacyjny dla badań w CLTSiMW

Fig. 3. The CLTSiMW blast side



Rys. 4. Zdjęcie pojedynczego ładunku MW

Fig 4. Single explosive charge image

W przypadku siatki otworów parametry były następujące: liczba otworów $n = 5$, odległość między otworami $a = 2$ m,

długość otworu $h = 1,3$ m, ładunek całkowity serii $Q_c = 8,25$ kg. Zastosowano opóźnienie międzystrzałowe 17 ms.

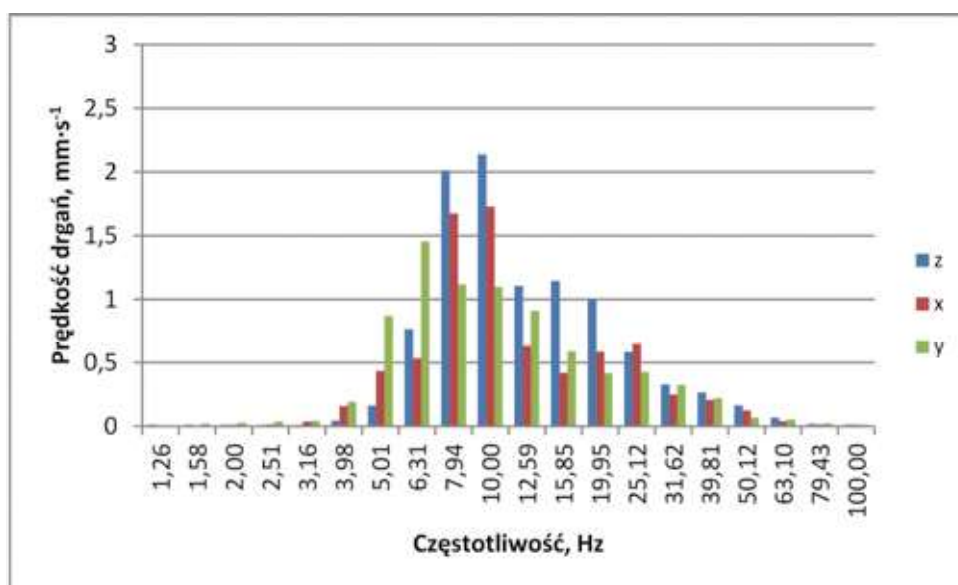
W wyniku detonacji pojedynczego ładunku dochodziło do wzbudzenia drgań parasejsmicznych, które wywoływały powstawanie sił bezwładności w obiekcie budowlanym. Celem zbadania struktury częstotliwościowej zarejestrowanych drgań wykonano analizę tercjową w pasmach 1/3 oktaowych. Przykładowe wyniki analizy dla drgań zarejestrowanych w dniu 16.08.2012 na gruncie i budynku obiektu budowlanego przedstawiono na rys. 5 i 6.

Zarejestrowane drgania przedstawione na rys. 5 i 6 charakteryzują się występowaniem częstotliwości dominujących w zakresie od ok $5 \div 15$ Hz.

3. Wyniki pomiaru

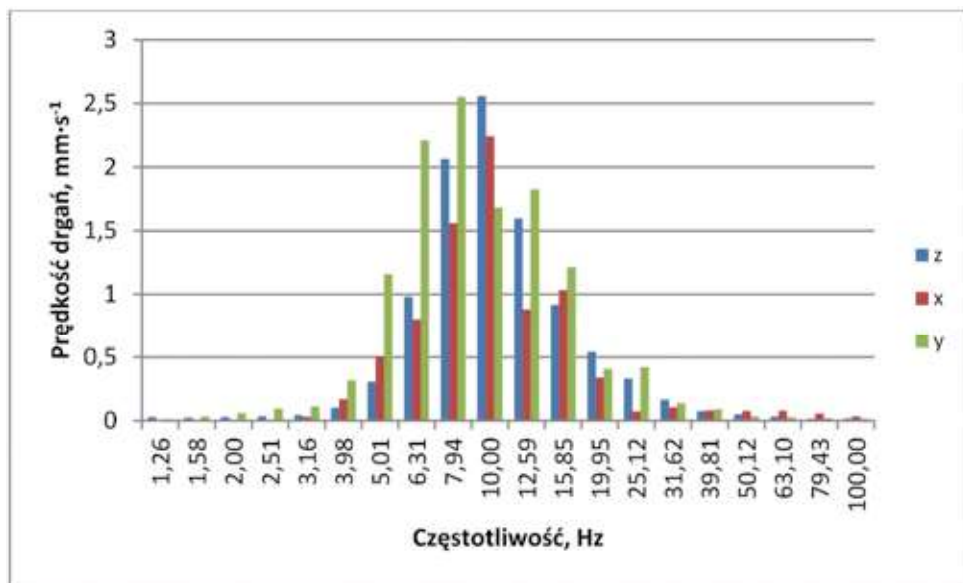
3.1. Analiza przebiegów prędkości drgań oraz naprężeń

W wyniku prowadzonych prac uzyskano przebiegi prędkości drgań oraz przeliczonych ze zmierzonych odkształceń,



Rys. 5. Struktura częstotliwościowa drgań zarejestrowanych w dniu 16.08.2012 na gruncie - CLTSiMW

Fig. 5. The octave analysis of the ground borne vibration registered on the ground – 16 August 2012



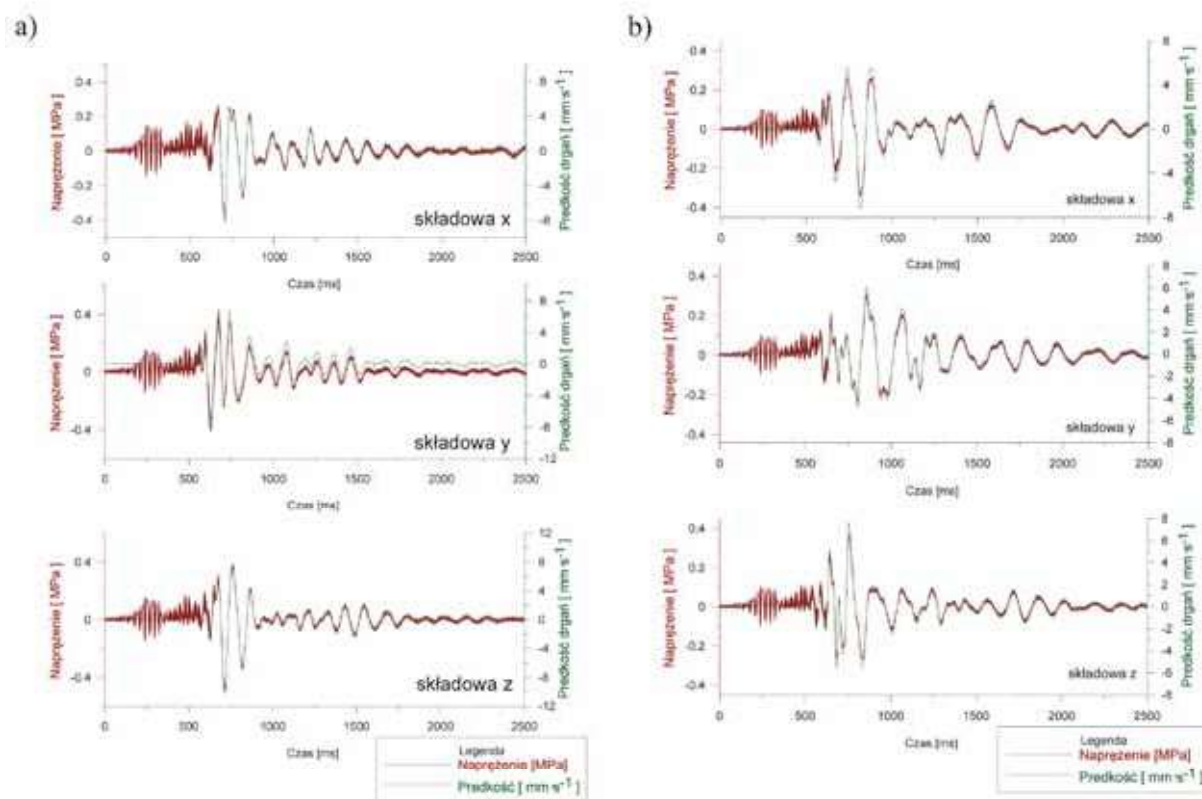
Rys. 6. Struktura częstotliwościowa drgań zarejestrowanych w dniu 16.08.2012 na budynku - CLTSiMW

Fig. 6. The octave analysis of the ground borne vibration registered at the construction – 16 August 2012

na podstawie prawa Hooke’a dla trójosiowego stanu naprężenia. Przykładowe przebiegi drgań oraz naprężeń uzyskane z detonacji pojedynczego otworu strzałowego przedstawiono na rys. 6a, zaś dla serii ładunków na rys. 6b.

Na podstawie rys. 6a i 6b można zauważyć liniową zależność pomiędzy przebiegami prędkości drgań oraz wywołanymi przez nie naprężeniami w całym zarejestrowanym

zapisie. Podobne charakterystyki otrzymano dla pozostałych prób. Wielkości maksymalnych naprężeń chwilowych dla pojedynczego otworu strzałowego wynosiły ok. 0,49 MPa (składowa z) oraz ok. 0,41 MPa (składowa x) i 0,42 MPa (składowa y), zaś dla serii ok. 0,39 MPa (składowa z) oraz ok. 0,39 MPa (składowa x) i 0,41 MPa (składowa y). Wielkości wyznaczonych naprężeń dla poszczególnych składowych oraz skorelowane z nimi wartości PPV przedstawiono w tab. 1.



Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi prędkości drgań oraz wyznaczonych naprężeń na obiekcie budowlanym: a) pojedynczy otwór - 14.09.2012, b) seria inicjowana systemem nieelektrycznym

Fig 6. The combine stress and ground borne vibration figure: a) single charge – 14 September 2012, b) blasting pattern

Tabela 1. Zarejestrowane wartości intensywności drgań oraz wyznaczonych naprężeń chwilowych - budynek CLTSiMW
Table 1. Maximum stress and PPV values registered at the CLTSiMW building

Data Nr zбору	Grunt/ Budynek	Prędkość drgań, mm/s			Naprężenie chwilowe, MPa		
		v_z	v_x	v_y	σ_z	σ_x	σ_y
16.08.2012	b	5,08	3,88	4,58	-	-	-
14.09.2012	b	10,30	7,87	8,37	0,49	0,41	0,42
14.09.2012	b	6,68	4,13	8,78	0,32	0,22	0,41
19.06.2013	b	7,78	7,75	5,95	0,37	0,36	0,29
19.06.2013	b	8,35	8,31	8,72	0,39	0,39	0,41

3.2. Analiza energetyczna sygnału

Analizę energetyczną zarejestrowanych przebiegów drgań oraz wyznaczonych naprężeń przeprowadzono w oparciu o analizę Matching Pursuit (MP). Metoda MP umożliwia dokładne scharakteryzowanie struktury energetycznej przebiegów drgań (przedstawienie najlepszego odzwierciedlenia cech sygnału). W pierwszym etapie analizy dochodzi do przypisania funkcji do wyjaśnianego sygnału, a następnie dopasowanie kolejnych zależności matematycznych do pozostałego sygnału, nazywanego sygnałem resztkowym, otrzymanym po kolejnych iteracjach. Wybór funkcji odbywa się ze zbioru $G = \{g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)\}$, nazywanego słownikiem Gabora. Dobór atomu odbywa się na zasadzie osiągnięcia największej korelacji pomiędzy nim

a wyjaśnianym fragmentem sygnału, czyli pojedynczą funkcją okna $g(t)$ (Biessikowski 2014, Sołtys 2011).

Uzyskane wyniki analizy dla drgań i naprężeń wzbudzonych detonacją materiału wybuchowego w pojedynczym otworze strzałowym przedstawiono odpowiednio na rys. 7 i 8 oraz w tab. 2 i 3, zaś dla odpalanej serii na rys. 9 i 10 i w tab. 4 i 5

Na podstawie rys. 7 i 8. oraz tab. 2 i 3 można zauważyć, że w przypadku detonacji pojedynczego ładunku MW, na każdej ze składowych uzyskane wartości PPV występują w tym samym momencie czasu (0,7 s) i praktycznie w tym samym zakresie częstotliwości ok. 10 Hz, co największe naprężenia chwilowe. Największa energia sygnału opisująca PPV oraz maksymalne naprężenie chwilowe osiągała odpowiednio wartości $3871,21 \left[\frac{m^2}{s^3}\right]$ i $11,21 \left[\frac{N}{cm^2}\right]$.

Rys. 7. Analiza energetyczna drgań wzbudzonych detonacją MW - pojedynczy otwór - a) składowa x, b) składowa y, c) składowa z

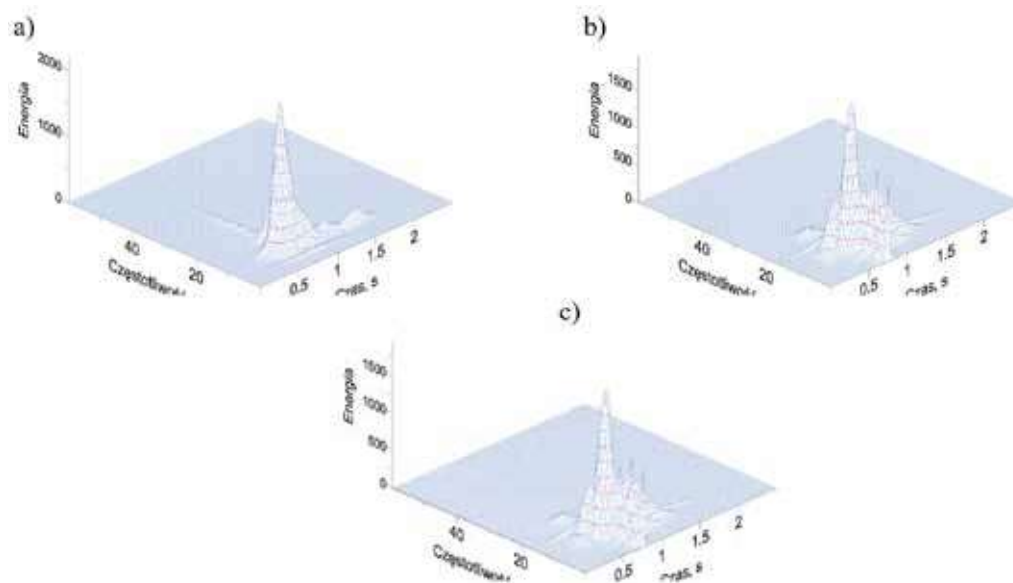


Fig 7. The results of MP analysis of the ground borne vibration obtained from the detonation of the single charge in - a) longitudinal, b) transversal, c) vertical direction

Rys. 8. Analiza energetyczna naprężeń wzbudzonych detonacją MW - pojedynczy otwór - a) składowa x, b) składowa y, c) składowa z

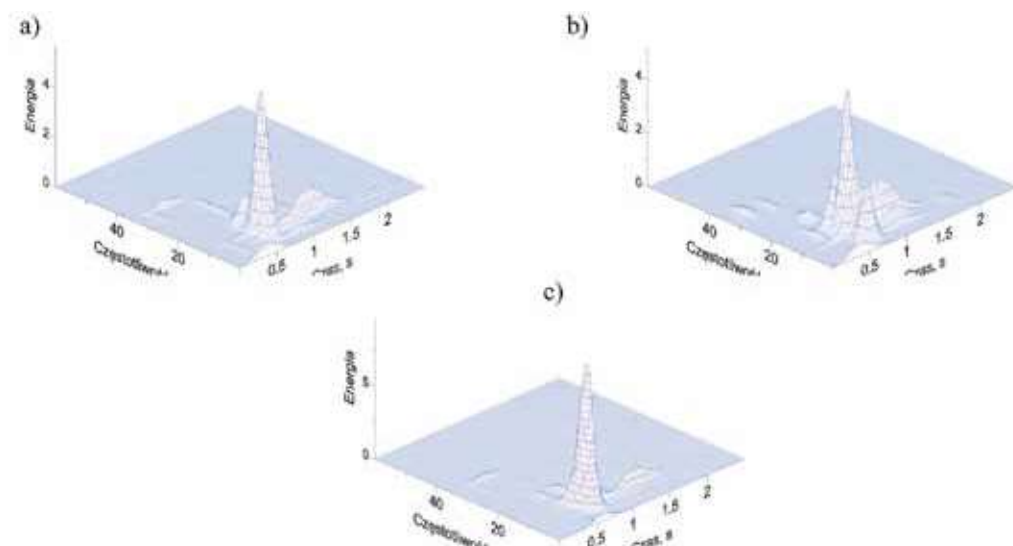


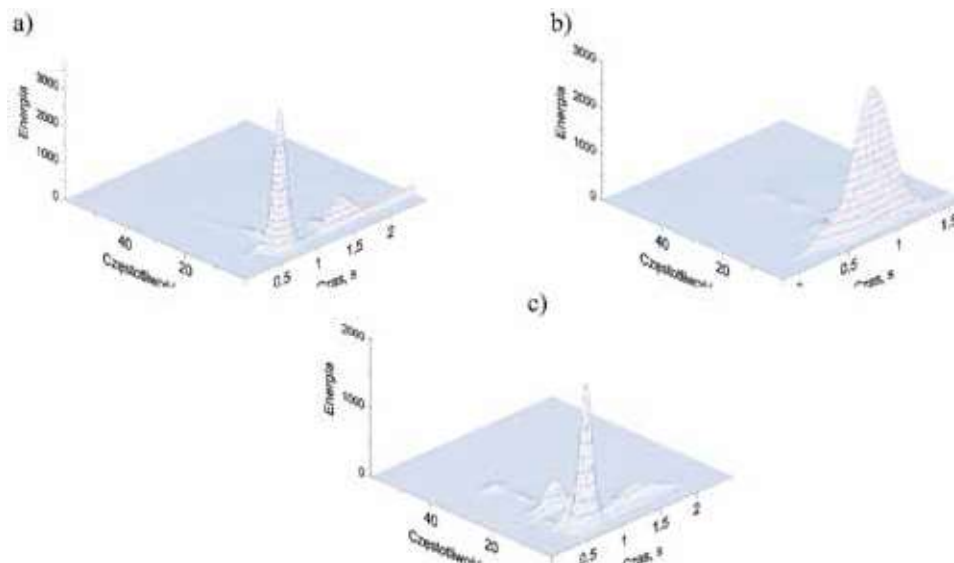
Fig 8. The results of MP analysis of the stress obtained from the detonation of the single charge in - a) longitudinal, b) transversal, c) vertical direction

Tabela 2. Wyniki analizy MP dla drgań wzbudzonych detonacją MW - pojedynczy otwór
Table 2. The results of the MP analysis of ground borne vibration - single charge

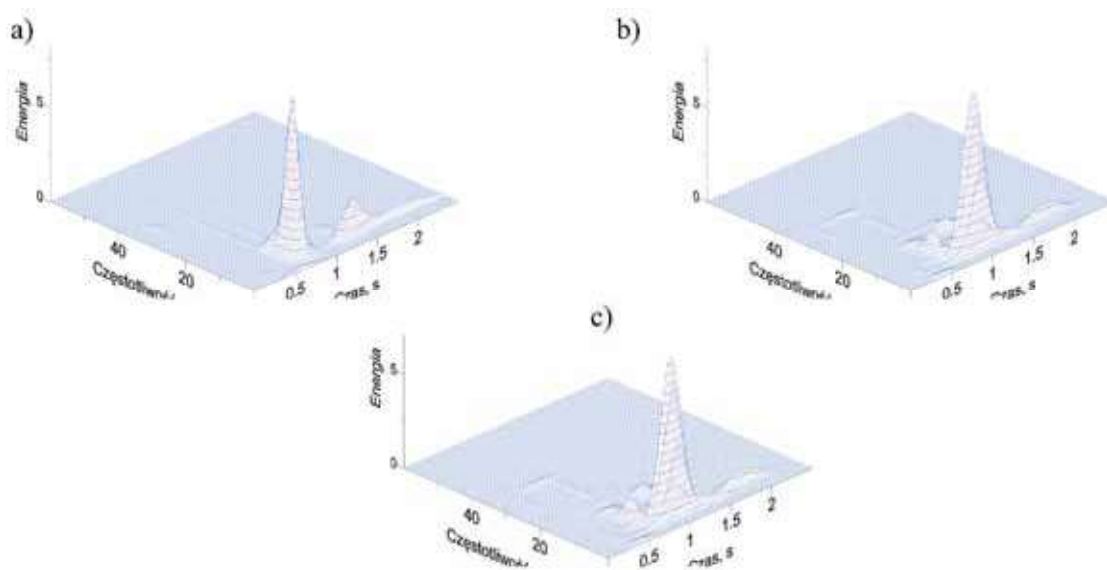
Składowa	Nr atomu	Czas, [s]	Częstotliwość, [Hz]	Energia, [$\frac{m^2}{s^2}$]
z	0	0,69	10,30	3871,21
z	1	0,76	7,03	1009,11
z	2	0,81	8,73	529,47
z	3	0,62	11,77	467,44
z	4	1,54	8,03	288,30
z	5	0,81	16,80	186,24
x	0	0,69	10,30	2325,01
x	1	0,83	8,33	677,65
x	2	0,83	16,17	437,85
x	3	1,57	8,47	228,89
x	4	1,26	10,43	133,57
x	6	0,73	20,20	118,26
y	0	0,69	10,63	1853,41
y	1	0,76	3,67	1150,10
y	2	0,97	10,37	672,93
y	3	0,63	14,20	596,93
y	4	0,90	5,67	197,56
y	5	1,28	7,87	127,44

Tabela 3. Wyniki analizy MP dla naprężeń wzbudzonych detonacją MW - pojedynczy otwór
Table 3. The results of the MP analysis of stress - single charge

Składowa	Nr atomu	Czas, [s]	Częstotliwość, [Hz]	Energia, [$\frac{d^2}{s^2}$]
z	0	0,73	9,00	11,21
z	2	0,63	11,78	1,18
z	1	1,37	8,61	1,14
z	4	0,77	16,89	0,49
z	5	0,59	0,17	0,47
x	0	0,70	9,94	6,48
x	1	1,28	8,72	1,26
x	2	0,75	16,50	1,21
x	3	0,85	7,44	0,61
y	0	0,68	11,83	5,39
y	1	0,71	5,83	2,13
y	2	0,66	15,33	1,80
y	3	0,99	9,94	1,80
y	5	1,20	8,11	0,48



Rys. 9. Analiza energetyczna drgań wzbudzonych detonacją MW - seria ładunków - a) składowa x, b) składowa y, c) składowa z
Fig. 9. The results of MP analysis of the ground borne vibration obtained from the detonation of the blasting pattern in - a) longitudinal, b) transversal, c) vertical direction



Rys. 10. Analiza energetyczna naprężeń wzbudzonych detonacją MW - seria ładunków - a) składowa x, b) składowa y, c) składowa z

Fig 10. The results of MP analysis of the stress obtained from the detonation of the blasting pattern in - a) longitudinal, b) transversal, c) vertical direction

Tabela 4. Wyniki analizy MP dla drgań wzbudzonych detonacją MW - seria otworów

Table 4. The results of the MP analysis of ground borne vibration - blasting pattern

Składowa	Nr atomu	Czas, [s]	Częstotliwość, [Hz]	Energia, [$\frac{m^2}{s^2}$]
z	0	0,76	7,03	2146,24
z	1	0,77	9,87	501,04
z	2	0,78	18,37	444,77
z	3	1,38	6,23	341,93
z	4	0,60	6,87	171,65
z	6	0,77	16,70	150,91
z	5	1,35	8,00	147,86
x	0	0,76	7,03	3903,43
x	1	1,53	5,23	878,32
x	2	0,679	4,37	333,89
x	3	1,033	8,73	227,18
x	4	2,223	13,23	196,74
x	5	0,864	5,20	122,85
y	0	0,91	8,63	3059,77
y	1	0,76	10,43	457,32
y	2	0,69	6,40	446,64
y	3	0,49	25,50	337,32
y	4	1,74	7,50	244,58
y	5	1,01	7,03	198,89
y	6	0,83	5,23	102,81

W przypadku odpalanej serii ładunku MW wartości PPV oraz maksymalne naprężenia chwilowe występują podobnie jak w przypadku pojedynczego ładunku w tym samym momencie czasu (0,77 s) i praktycznie w tym samym zakresie częstotliwości ok. 8 Hz, rys. 9 i 10 oraz tab. 4 i 5. Największa energia sygnału opisująca PPV oraz maksymalne naprężenie chwilowe osiągały odpowiednio wartości $3903,43 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$ i $8,56 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów w warunkach laboratoryjnych określono ustawienia aparatury pomiarowej

(częstotliwość próbkowania 1200 Hz, 10% filtr Bessela), które umożliwią rejestrację odkształceń wywołanych wpływami dynamicznymi uzyskiwanymi z detonacji MW. Dodatkowo, opracowano metodykę związaną z przygotowaniem powierzchni oraz naklejeniem czujników tensometrycznych oraz zaobserwowano i zdiagnozowano możliwe błędy, jakie mogą zachodzić podczas rejestracji odkształceń.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów w warunkach laboratoryjnych otrzymano przykładowe charakterystyki zapisu prędkości drgań oraz naprężeń w zakresie niższych wartości częstotliwości. Na podstawie uzyskanych przebiegów zauważono liniową zależność pomiędzy zarejestrowanymi prędkościami drgań oraz wyznaczonymi przebiegami naprężeń w całej dziedzinie czasu. Uzyskane charakterystyki zapisów

Tabela 5. Wyniki analizy MP dla naprężeń wzbudzonych detonacją MW - seria otworów
Table 5. The results of the MP analysis of stress - blasting pattern

Składowa	Nr atomu	Czas, [s]	Częstotliwość, [Hz]	Energia, [$\frac{m^2}{s^2}$]
z	0	0,77	7,72	5,81
z	1	0,70	18,33	1,46
z	2	1,59	6,33	1,03
z	3	1,35	7,72	0,49
z	4	1,03	10,17	0,28
z	6	0,86	5,11	0,24
x	0	0,77	7,44	8,56
x	1	1,41	5,11	1,94
x	2	0,75	11,89	0,76
x	3	1,86	4,28	0,48
x	4	1,51	7,22	0,31
x	5	0,87	5,67	0,28
y	0	0,99	5,50	8,55
y	1	0,70	10,33	1,13
y	2	1,10	3,72	0,73
y	3	1,86	5,33	0,71
y	4	1,12	16,78	0,45
y	5	0,72	7,28	0,29

otrzymano zarówno w przypadku odpalania pojedynczych ładunków oraz serii otworów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy MP, zauważono zależność pomiędzy PPV a maksymalnym naprężeniem chwilowym. Analizowane maksymalne wartości występują praktycznie w tych samych momentach czasu oraz w tym samym zakresie częstotliwości. Świadczy to o występującej zależności pomiędzy odkształceniem przeliczonym na naprężenie a prędkością drgań.

W dalszych pracach konieczne jest przeprowadzenie dalszych pomiarów w warunkach przemysłowych oraz ewentualna weryfikacja wniosków.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej nr 11.11.100.597

Literatura

- BIESSIKIRSKI A. 2014 – Pomiary oddziaływania parasejmicznego na obiekty budowlane, „Wiadomości Górnicze”, 65, nr 11, s. 601-610.
- BIESSIKIRSKI A. 2016 – Zależność między intensywnością drgań pochodzących od robót strzałowych a odpowiedzią fundamentu obiektu budowlanego, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (praca doktorska).
- BOZDAG E., SUNBULOGLU E., ERSOY H., 2006 – Vibration analysis of new Galata Bridge experimental and numerical results, Computers and Structures, nr 84, s. 283–292.
- CAI M., PENG H., MA X., JIANG J., 2009 – Evolution of the in situ rock strain observed at Shandan monitoring station during the M8.0 earthquake in Wenchuan, China, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, nr 46, s. 952–955.
- COSTA B.J.A., FIGUEIRAS, J.A., 2012 – Evaluation of a strain monitoring system for existing steel railway bridges, Journal of Constructional Steel Research, nr 72, s. 179-191.
- KACZOR D. 2002 – Obserwacje zmian zachodzących w górotworze podczas jego deformacji za pomocą metod elektrooporowych, WUG „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 5, s. 43-54.
- MA G.W., HAO H., ZHOU Y.X. 1998 – Modeling of wave propagation induced by underground explosion, Computer and Geotechnics, nr 22, s. 283–303.
- MÜLLER B., HAUSSMANN J., NIEDZWIEDŹ H., 2007a – Comparison of different methods of measuring and calculating blast vibrations in rock mass, Proc. of EFEE's 4th World Conference on Explosive and Blasting Technique in Vienna, Austria, s. 127-138.
- PYRA J., 2008 – Ocena oddziaływania górniczych robót strzałowych na obiekty budowlane, „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 3, s. 41–47.
- SOŁTYS A., 2011 – Analiza oddziaływania na otoczenie drgań wzbudzanych przez roboty strzałowe z zastosowaniem metody MP, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (praca doktorska).
- Vishay Precision Group, 2010a – Surface Preparation for Strain Gage Bonding, Micro-Measurements Instruction Bulletin B-129-8.
- Vishay Precision Group, 2010b – Strain gage selection: Criteria, Procedures, Recommendations., Tech Note TN-505-4.
- Źródło internetowe 16: http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain_gages
- Źródło internetowe 17: <http://www.vishaypg.com/StrainGageInstallationsforConcreteStructures>. Vishay Precision Group. Micro-Measurements. Application Note TT-611

Artykuł wpłynął do redakcji – 2 grudnia 2016
 Artykuł akceptowano do druku 15.02.2017