

Oznaczanie prędkości detonacji wybranych idealnych materiałów wybuchowych przy użyciu metody ciągłej i odcinkowej

Determination of the Detonation Velocity of Selected Ideal Explosives by the Use of Continuous and Start-stop Methods



Dr inż. Piotr Mertuszka^{*)}



Mgr inż. Mateusz Pytlik^{**)}

Treść: W trakcie oznaczania prędkości detonacji górniczych materiałów wybuchowych przy użyciu urządzenia MicroTrap pojawiło się wiele wątpliwości dotyczących dokładności otrzymywanych wyników pomiarów ze względu na zastosowany materiał badawczy. W związku z powyższym przeprowadzono serię pomiarów prędkości detonacji idealnych materiałów wybuchowych (oktogen flegmatyzowany, heksogen flegmatyzowany, trotyl) przy użyciu Explometru Wielokanałowego oraz rejestratora MicroTrap. W trakcie badań, te same ładunki materiału wybuchowego i w tych samych warunkach zostały uzbrojone sondami do obu systemów pomiarowych. W ramach artykułu przedstawiono wyniki pomiarów prędkości detonacji idealnych materiałów wybuchowych przeprowadzonych metodą ciągłą i odcinkową (zwarciową).

Abstract: During the measurements of the detonation velocity of mining explosives using the MicroTrap VOD/Data Recorder, many doubts arose regarding the accuracy of the results obtained. Consequently, a series of detonation velocity tests of ideal explosives (phlegmatized HMX, phlegmatized RDX, TNT) by the use of multi-channel Explomet and MicroTrap recorder were carried out. The same explosives under the same conditions were fitted with continuous and start-stop probes during the tests. The article presents the results of detonation velocity measurements of ideal explosives carried out by the use of continuous and start-stop methods (short-circuit).

Słowa kluczowe:

materiały wybuchowe, prędkość detonacji

Keywords:

explosives, velocity of detonation, VOD

1. Wprowadzenie

Prędkość detonacji jest jednym z parametrów charakteryzujących materiał wybuchowy (MW). Opisuje ona z jaką prędkością wewnątrz ładunku materiału wybuchowego przemieszcza się czoło fali detonacyjnej (Włodarczyk 2012). Oznaczanie prędkości detonacji jest jednym z podstawowych badań podczas dokonywania oceny zgodności MW według dyrektywy 2014/28/UE. Prędkość detonacji, z górniczego punktu widzenia, jest parametrem, który w bezpośredni sposób wpływa na efektywność robót strzałowych.

Wartości prędkości detonacji podawane przez producentów materiałów wybuchowych określone są laboratoryjnie. Niestety warunki te nie mają bezpośredniego przełożenia na zachowanie się MW w warunkach ruchowych zakładu

górniczego, ponieważ nie obejmują szeregu czynników zewnętrznych, które wpływają na ich zachowanie w tzw. warunkach rzeczywistych. Na prędkość detonacji MW może wpływać wiele czynników związanych ze stosowaną metodą urabiania, a których nie uwzględniają badania znormalizowane (Chiappetta 1998). Najważniejsze z nich to skład materiału wybuchowego, temperatura otoczenia i temperatura ładunku (Dobrilović i in. 2014), rodzaj i wielkość środka inicjującego (Żganec i in. 2016; Mertuszka i in. 2017b), czas od załadunku do odpalenia MWE luzem (Pradhan 2010; Mertuszka, Kramarczyk 2018), średnica ładunku MW i średnica otworu strzałowego (Arvanitidis i in. 2004; Mertuszka i in. 2019a), typ ośrodka, w którym detonowany jest materiał wybuchowy (Agrawal, Mishra 2017) oraz gęstość – szczególnie ważna w przypadku MWE luzem (Mertuszka i in. 2019b).

Badania znormalizowane prowadzone są każdorazowo w zbliżonych warunkach laboratoryjnych opisanych szczegóło-

^{*)} KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław – Polska

^{**)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice – Polska

w o normie PN-EN 13631-14:2005: Materiały wybuchowe do użytku cywilnego – Materiały wybuchowe kruszące – Część 14: Oznaczanie prędkości detonacji. Nie uwzględniają one jednak wyżej wymienionych czynników związanych ze stosowaną technologią górniczą. Badania prędkości detonacji z wykorzystaniem pomiaru ciągłego mogą być prowadzone bezpośrednio w otworach strzałowych. Są one całkowicie bezkolizyjne i nie zaburzają ciągu technologicznego w zakładzie górniczym. Ten typ badań pozwala określić, na ile zmierzono wartości w warunkach *in situ* pokrywają się z wartościami oznaczonymi w badaniach znormalizowanych. Jednocześnie badania te umożliwiają sprawdzenie czy dany MW nie zmienia swoich parametrów użytkowych wraz ze zmianą warunków, w których jest stosowany (Mertuszka, Fuławka 2017).

W trakcie prowadzenia pomiarów prędkości detonacji górniczych materiałów wybuchowych metodą ciągłą pojawiły się wątpliwości dotyczące dokładności otrzymywanych wyników. W związku z powyższym przeprowadzono serię badań prędkości detonacji idealnych materiałów wybuchowych, w tym oktogenu flegmatyzowanego, heksogenu flegmatyzowanego i trotylu. W trakcie badań porównawczych, ładunki materiału wybuchowego zostały jednocześnie uzbrojone sondami do pomiaru odcinkowego i ciągłego.

W ramach artykułu dokonano porównania znormalizowanej metody oznaczania prędkości detonacji idealnych materiałów wybuchowych z metodą opartą o pomiar ciągły (nieakredytowaną), co miało na celu sprawdzenie, w jakim stopniu wyniki badań prowadzonych równolegle obiema metodami są ze sobą zbieżne. W metodzie akredytowanej zastosowano Explometr Wielokanałowy, natomiast do pomiarów ciągłych – aparaturę MicroTrap.

2. Metodyka i przedmiot badań

Wzrost zużycia materiałów wybuchowych w górnictwie światowym przyczynił się do rozwoju technologii w zakresie urządzeń do oznaczania prędkości detonacji. W chwili obecnej na rynku dostępnych jest kilka systemów pomiarowych, które różnią się między sobą dokładnością i metodyką pomiaru (Harsh i in. 2005; Mishra, Sinha 2003). Biorąc pod uwagę mierzony parametr oraz sposób konwersji danych, metody pomiaru prędkości detonacji można podzielić na optyczne, elektryczne i elektrooptyczne, natomiast z uwagi na rozdzielczość rejestrowanych danych – na odcinkowe i ciągłe.

2.1. Metoda odcinkowa

Zgodnie z normą PN-EN 13631-14:2005 (Materiały wybuchowe do użytku cywilnego – Materiały wybuchowe kruszące – Część 14: Oznaczanie prędkości detonacji), podstawową metodą stosowaną do pomiarów prędkości detonacji materiałów wybuchowych i będącą jednocześnie metodą akredytowaną jest metoda odcinkowa. Pomiar polega na zarejestrowaniu czasu przejścia czoła fali detonacyjnej pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi. Licznik czasu w tej metodzie uruchamiany jest w momencie zwarcia pierwszej sondy pomiarowej przez postępującą w materiale wybuchowym falę detonacyjną, a zakończony w momencie zwarcia drugiej sondy. Przykładem urządzenia do pomiaru odcinkowego jest Explometr Wielokanałowy (rys. 1). Wynik pomiaru czasu podawany jest z rozdzielczością 0,1 μ s. Na podstawie wcześniej określonej odległości pomiędzy dwoma sondami pomiarowymi obliczana jest średnia prędkość detonacji dla danego odcinka, która wyświetlana jest bezpośrednio po zakończeniu pomiaru na wyświetlaczu urządzenia.



Rys. 1. Explometr Wielokanałowy
Fig. 1. Multi-channel Explomet

Na dokładność pomiaru urządzeniem Explometr wpływają m.in. odległość pomiędzy czujnikami i precyzją jej określania, rodzaj czujników (druty/światłowodowy), dokładność i rozdzielczość pomiaru czasu oraz sposób montażu sond w ładunku MW. Dokładność metody dla badań górniczych materiałów wybuchowych na odcinku pomiarowym 300 mm w metodzie odcinkowej została określona w laboratorium akredytowanym na ± 30 m/s. Ze względu na skrócenie bazy pomiarowej do 170 mm oraz na zastosowane do badań idealne materiały wybuchowe, których prędkość detonacji w większości przypadków przekracza 8000 m/s, zweryfikowano i obliczono niepewność rozszerzoną pomiaru, która wyniosła dla tej metody ± 100 m/s.

2.2. Metoda ciągła

Metoda ciągła umożliwia oznaczanie prędkości detonacji materiałów wybuchowych w momencie ich odpalania w otworach strzałowych (Mertuszka i in. 2017a; Szastok 2014). Pozwala ona określić nie tylko wartość prędkości detonacji na danym odcinku ładunku, ale także prześledzić jej zmiany na całej długości kolumny MW. Przykładem urządzenia do pomiaru ciągłego jest jednokanałowe urządzenie MicroTrap (rys. 2). Precyzyjną sondę pomiarową o znanej rezystancji liniowej, dedykowaną do ww. urządzenia, umieszcza się w materiale wybuchowym równoległe do kierunku detonacji. W momencie przechodzenia czoła fali detonacyjnej, materiał wybuchowy niszczy sondę, a rezystancja obwodu spada proporcjonalnie do zmniejszania się jej długości. W tym czasie rejestrator zapisuje zmiany napięcia sondy w funkcji czasu z częstotliwością 2 MHz. W trakcie pracy, do sond umieszczonych w MW, rejestrator generuje napięcie stałe nieprzekraczające 5 V i natężenie prądu na poziomie 50 mA, co gwarantuje, że nie ma możliwości doprowadzenia do przedwczesnej inicjacji badanego materiału wybuchowego.

Rolę sondy, w zależności od rodzaju badań, pełni przewód koncentryczny lub rurka koncentryczna o klasycznej konfiguracji standardowych przewodów koncentrycznych typu RG, gdzie przewód o wysokiej rezystancji jest przewodnikiem głównym, a opłot ekranu pełni funkcję przewodu powrotnego. Przewód typu ProbeCable stosuje się do badań ładunków umieszczonych w otworach strzałowych, natomiast do badań ładunków poza otworami – rurkę koncentryczną typu ProbeRod, która dostępna jest w różnych wariantach długości: od 30 cm do 100 cm. Producent deklaruje, że niepewność pomiarowa w metodzie ciągłej wynosi $\pm 2\%$ i jest głównie związana z rozrzutem rezystancji jednostkowej stosowanych



Rys. 2. Rejestrator MicroTrap
Fig. 2. MicroTrap VOD/Data recorder

sond od wartości nominalnej. Dołączone oprogramowanie systemu automatycznie przedstawia zarejestrowane dane w formie wykresu, jako funkcja odległości w czasie, a także oblicza i wyświetla prędkość detonacji MW w dowolnym wybranym miejscu na wykresie.

2.3. Przedmiot badań

Do badań porównawczych zastosowano trzy typy idealnych materiałów wybuchowych. Każda z próbek badawczych

składała się z siedmiu cylindrycznych kostek danego typu materiału wybuchowego, tj. oktogenu flegmatyzowanego (HMX_n) o średnicy 29,2 mm, heksogenu flegmatyzowanego (RDX_n) o średnicy 29,1 mm i trotylu (TNT) o średnicy 29,5 mm. Wszystkie materiały wybuchowe inicjowano od zapalnika elektrycznego metanowego natychmiastowego o masie ładunku wtórnego wynoszącej 0,65 g PETN. Pomiary wykonano zgodnie z procedurą określoną w normie PN-EN 13631-14:20054, tj. po trzy próbki dla każdego analizowanego MW, dla których wyznaczano wartość średnią.

Oktogen flegmatyzowany (rys. 3) jest to ciało stałe, krystaliczne o barwie białej. Jest to jeden z najsilniejszych znanych obecnie kruszących materiałów wybuchowych.

Heksogen flegmatyzowany (rys. 4) jest to ciało stałe w postaci drobnego granulatu o barwie pomarańczowej. Jest jednym z najsilniejszych materiałów wybuchowych kruszących. Stosowany głównie jako militarny materiał wybuchowy w postaci indywidualnych ładunków lub też jako składnik wielu mieszanin. Stosowany często w ładunkach kumulacyjnych, a także pancierzach reaktywnych.

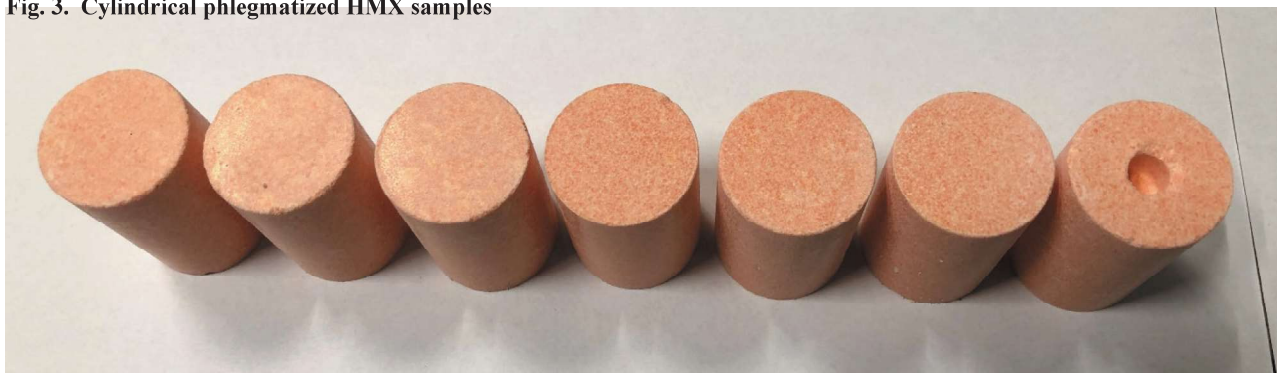
Trotyl (rys. 5) jest ciałem stałym o barwie żółtej. Dostępny jest w postaci łusek, kryształów lub też jako lany w tafle. Jest materiałem wybuchowym o dużej twardości chemicznej i małej wrażliwości na bodźce mechaniczne, która zależy od temperatury i postaci w jakiej występuje.

Podstawowe parametry analizowanych materiałów wybuchowych przedstawiono w tabeli 1.

Pomiar prędkości detonacji prowadzono równoległe Explometrem Wielokanałowym oraz rejestratorem MicroTrap. W tym celu, te same ładunki materiału wybuchowego i w tych samych warunkach zostały uzbrojone sondami do pomiaru ciągłego i odcinkowego. Próbka badawcza składała się z 7 cylindrycznych kostek MW połączonych taśmą, tworząc jednolitą kolumnę MW o długości około 300 mm. Procedurę badań przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 3. Cylindryczne próbki oktogenu flegmatyzowanego
Fig. 3. Cylindrical phlegmatized HMX samples



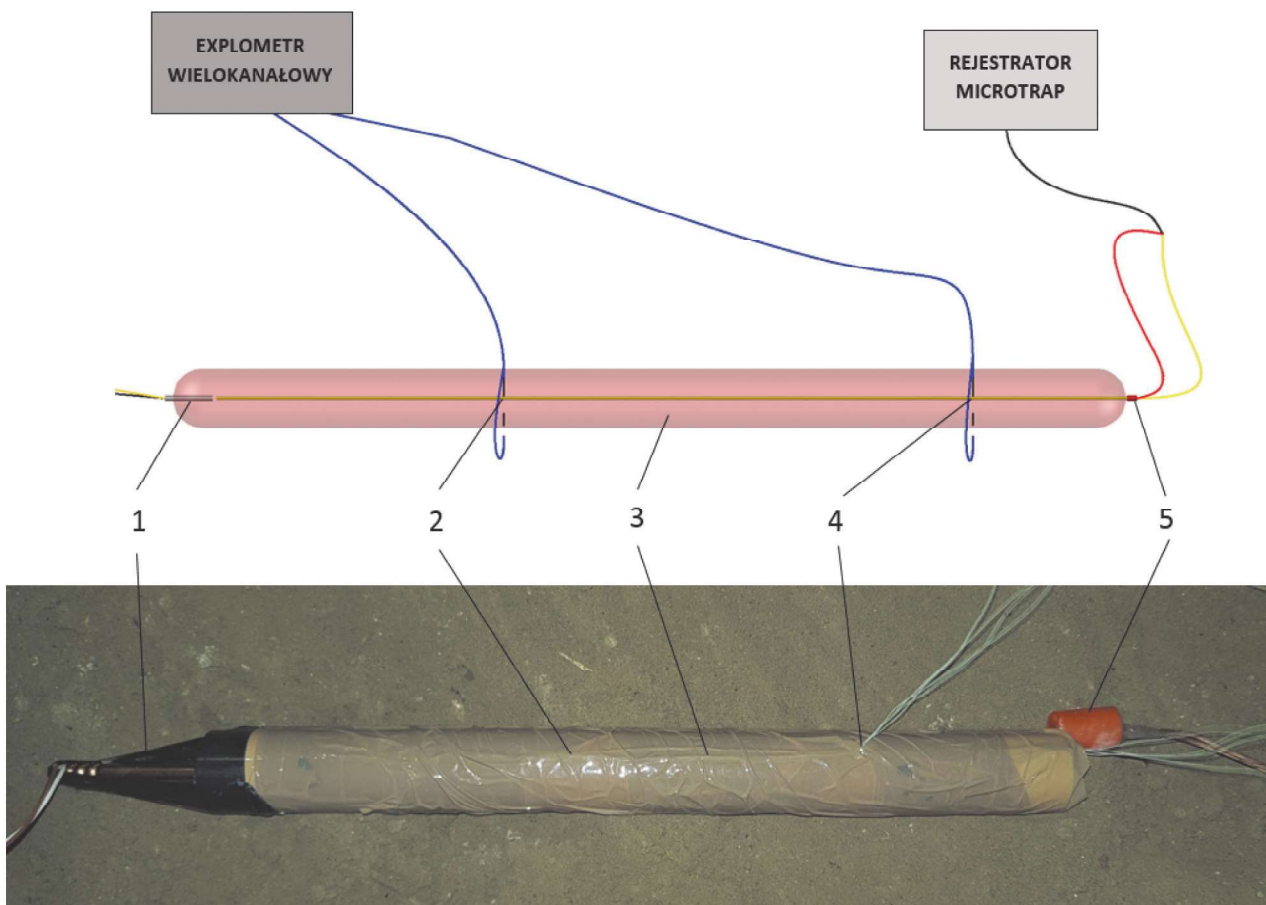
Rys. 4. Cylindryczne próbki heksogenu flegmatyzowanego
Fig. 4. Cylindrical phlegmatized RDX samples



Rys. 5 Cylindryczne próbki trotylu
Fig. 5. Cylindrical TNT samples

Tabela 1. Podstawowe parametry badanych MW (wg danych producenta)
Table 1. Basic parameters of the tested explosives (based on manufacturer's data)

Parametr	Oktogen flegmatyzowany	Heksogen flegmatyzowany	Trotyl
Gęstość [g/cm ³]	1,90	1,82	1,64
Prędkość detonacji [m/s]	8 800	8 750	6 900
Wrażliwość na tarcie [N]	235	318	> 353
Wrażliwość na uderzenie [J]	7,36	7,36	14,7
Ciepło wybuchu [kJ/kg]	5 196	5 192	4 111



1 – zapalnik, 2 i 4 punkty pomiarowe, 3 – ładunek MW, 5 – sonda pomiarowa typu *ProbeRod*

Rys. 6. Procedura badań: schemat ładunku (góra) i widok uzbrojonej próbki (dół)
Fig. 6. Research procedure: charge scheme (above) and view of the armed sample (below)

Do badań ciągłych zastosowano sondę pomiarową typu *ProbeRod* o długości 30 cm i nominalnej rezystancji wynoszącej $1\ 051\ \Omega/m$. W badaniach Explometrem zastosowano sondy zwarciove umieszczone w odległości 170 mm od siebie. Z uwagi na dostępną liczbę próbek badawczych nie osiągnięto odległości określonej w normie PN-EN 13631-14:2005, tj. co najmniej pięciu średnic ładunku MW pomiędzy zapalnikiem i pierwszą sondą. Założono jednak, że w przypadku badań idealnych MW, odległość trzech średnic dla odcinka rozbiegowego jest wystarczająca na osiągnięcie poziomu stabilnej detonacji.

3. Część doświadczalna

Badania prowadzono na poligonie doświadczalnym Głównego Instytutu Górnictwa w Mikołowie. Próbki odpalano w bunkrze strzałowym układając je na spągu i przysypując około 30-centymetrową warstwą piasku. Każdą kolejną próbkę odpalano po całkowitym przewietrzeniu bunkra z gazów postrzałowych.

W celu porównania metody odcinkowej (normowej) z metodą ciągłą, analizie poddano ten sam odcinek pomiarowy o długości 170 mm, pomiędzy którym umieszczone zostały sondy do pomiaru odcinkowego. Przykładowy wykres prędkości detonacji oktogenu flegmatyzowanego oznaczony metodą ciągłą z zaznaczonymi punktami pomiarowymi dla metody odcinkowej przedstawia rysunek 7.

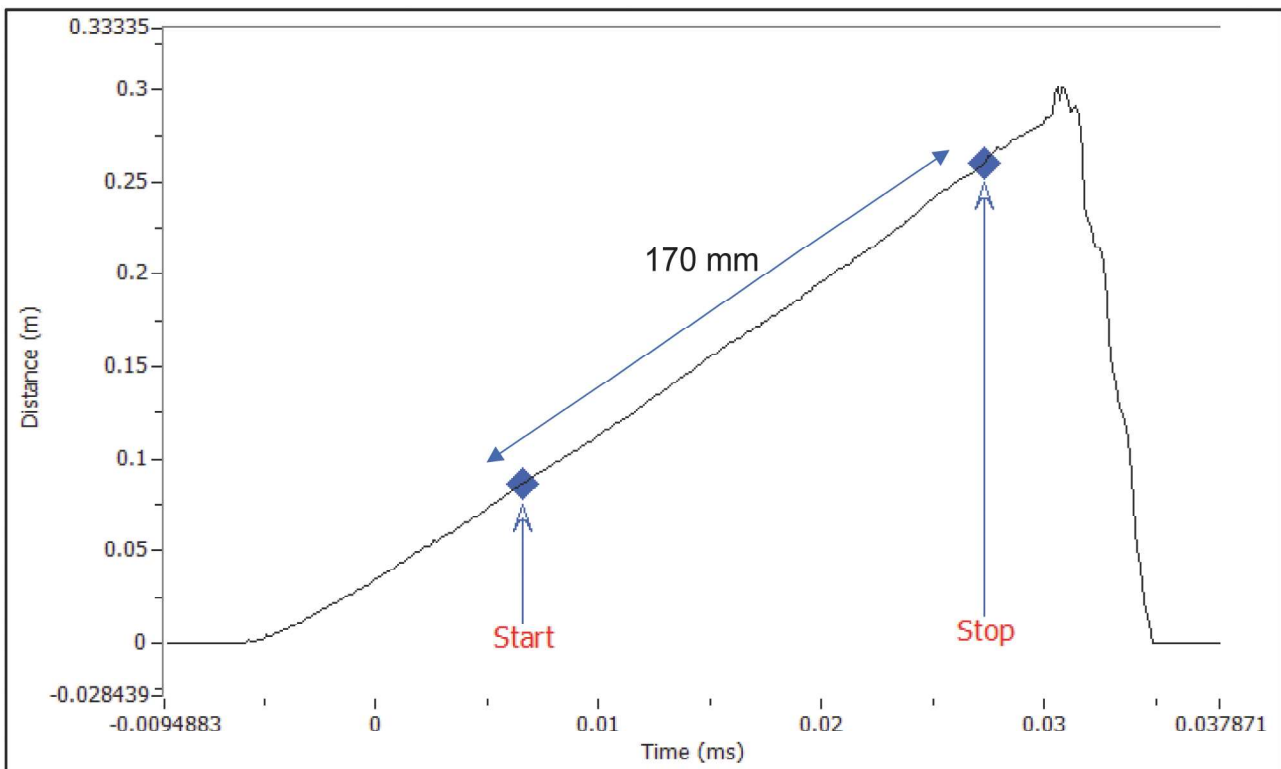
Z uwagi na stosunkowo niewielkie zakłócenia, prędkość detonacji urządzeniem MicroTrap można wyznaczyć zarówno metodą regresji liniowej, jak i dwóch dowolnie wybranych na wykresie punktów. W celu zwiększenia precyzji wyników,

prędkość wyznaczano metodą regresji liniowej na odcinku, na którym umieszczono sondy do pomiaru Explometrem Wielokanałowym (współczynnik korelacji dla wszystkich testów przekraczał 0,99). Ponadto, metodą ciągłą oznaczono prędkość detonacji na odcinkach rozbiegowych, tj. odcinkach pomiędzy punktem inicjacji ładunków MW i punktem instalacji pierwszej sondy w metodzie odcinkowej (rys. 8).

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2. Zawierają one prędkości detonacji uzyskane dla każdej próbki metodą ciągłą i odcinkową oraz prędkość oznaczoną metodą ciągłą na odcinku tzw. rozbiegu MW.

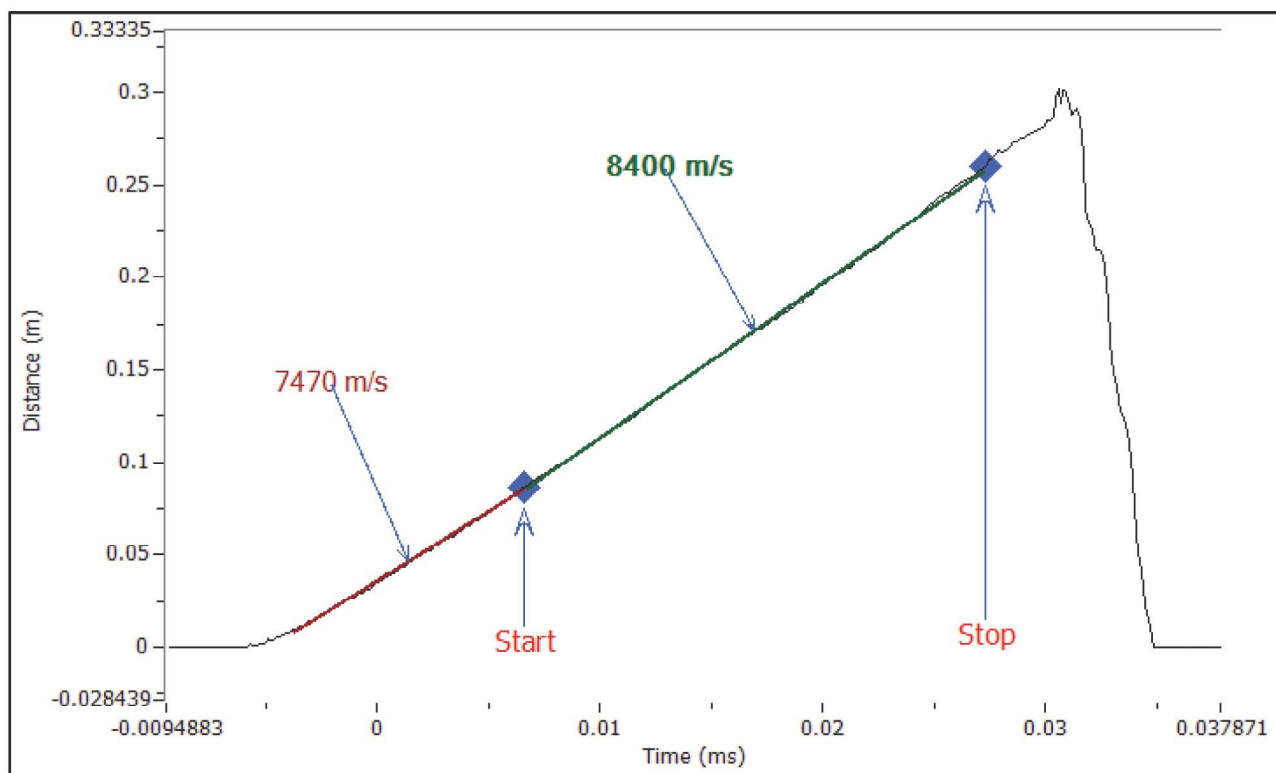
Jak wynika z danych zarejestrowanych metodą ciągłą, prędkość detonacji na obu odcinkach różni się w każdym z analizowanych przypadków o ponad 10%. Oznacza to, że etap rozbiegu dla analizowanych MW wynosił blisko 9 cm do osiągnięcia poziomu tzw. detonacji stabilnej. Na uwagę zasługuje również moment przeniesienia detonacji z zapalnika na materiał wybuchowy, który jest praktycznie niezauważalny.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że rozrzut otrzymanych wyników wokół wartości średniej jest zbliżony dla obu urządzeń pomiarowych z niewielką przewagą dla wyników otrzymanych metodą odcinkową. Największy rozrzut wyników wokół wartości średniej prędkości detonacji przy badaniu urządzeniem MicroTrap zanotowano dla próbek oktogenu flegmatyzowanego. Wartość ta wyniosła 40 m/s. Dla metody odcinkowej rozrzut od wartości średniej wyniósł maksymalnie 14 m/s (dla heksogenu flegmatyzowanego i trotylu). Co ciekawe, niepewność pomiarowa dla Explometru Wielokanałowego została obliczona i przyjęta jako $\pm 100\ m/s$. Dla porównania, niepewność w systemie MicroTrap wynosi $\pm 2\%$, co przy otrzymanych prędkościach w zakresie $6\ 557\ m/s - 8\ 410\ m/s$ oznacza niepewność w granicach $131\ m/s - 168\ m/s$. Oznacza to, że wszystkie zarejestrowane prędkości mieszczą się



Rys. 7. Wykres prędkości detonacji oktogenu flegmatyzowanego uzyskany metodą ciągłą z zaznaczonymi punktami pomiarowymi wykorzystanymi do oznaczenia prędkości metodą odcinkową

Fig. 7. VOD plot of phlegmatized HMX obtained by continuous method with measuring points used to determine velocity by start-stop method



Rys. 8. Wykres prędkości detonacji oktogenu flegmatyzowanego (próbka 1) z oznaczoną średnią prędkością detonacji na dwóch odcinkach

Fig. 8. VOD plot of phlegmatized HMX (sample 1) with the mean velocity value over two sections

Tabela 2. Wyniki pomiarów prędkości detonacji metodą odcinkową oraz ciągłą

Table 2. Results of VOD measurements using the start-stop and continuous method

Typ pomiaru	Rodzaj MW	Prędkość detonacji [m/s]			
		próbka 1	próbka 2	próbka 3	średnia
odcinkowy	HMXfl	8 122	8 084	8 106	8 104
ciągły		8 400	8 270	8 410	8 360
odcinkowy	RDXfl	8 075	8 122	8 085	8 094
ciągły		8 310	8 350	8 300	8 320
odcinkowy	TNT	6 557	6 605	6 593	6 585
ciągły		6 720	6 800	6 790	6 770
Prędkość detonacji na odcinku tzw. rozbiegu MW [m/s]					
ciągły	HMXfl	7 470	7 300	7 430	7 400
	RDXfl	7 370	7 330	7 350	7 350
	TNT	6 260	5 950	6 150	6 120

w granicach błędów pomiarowych analizowanych systemów.

Analizując wyniki pomiarów prędkości detonacji rozpatrywanych materiałów wybuchowych, można zauważyć, że wszystkie wyniki, zarówno średnie, jak i poszczególnych próbek, są o około 2–4% większe dla metody ciągłej. Ponadto, żaden z analizowanych materiałów wybuchowych nie osiągnął prędkości detonacji deklarowanej przez producenta. Średnie wartości prędkości są mniejsze od wartości deklarowanej o ponad 8% dla oktogenu flegmatyzowanego i heksogenu flegmatyzowanego w metodzie odcinkowej oraz ponad 5% w metodzie ciągłej. W przypadku trotylu wartości te są o blisko 5% mniejsze dla metody odcinkowej i niecałe 2% dla metody ciągłej. Niemniej zgodnie z zapisami normy [PN-EN 13631-14:2005](#), materiał wybuchowy spełnia jej wymagania w przypadku, kiedy prędkość detonacji każdej z trzech badanych próbek wynosi co najmniej 90% wartości deklarowanej

przez producenta. Oznacza to, że prędkości detonacji analizowanych materiałów wybuchowych spełniają wymagania wyższej normy.

Wyznaczone średnie prędkości detonacji na odcinku tzw. rozbiegu materiału wybuchowego do prędkości stabilnej detonacji są o około 11–12% mniejsze dla oktogenu flegmatyzowanego i heksogenu flegmatyzowanego w stosunku do prędkości detonacji stabilnej oznaczonej na odcinku sond pomiarowych metody odcinkowej. Dla trotylu wartości te były niższe w granicach 6–12% (średnio niecałe 10%). Z zarejestrowanych przebiegów prędkości detonacji metodą ciągłą wynika, że pomimo zastosowania odcinka pomiarowego o długości trzech średnic ładunku, niespełniającego wymagań normy [PN-EN 13631-14:2005](#), prędkość detonacji analizowanych materiałów wybuchowych osiągnęła stabilną wartość na badanym odcinku pomiarowym.

Warto także zaznaczyć, że prędkości detonacji górniczych materiałów wybuchowych oznaczanych metodą odcinkową oraz ciągłą, ze względu na ich skład oraz sposób wytwarzania, charakteryzują się zdecydowanie większym rozrzutem wartości niż prędkości detonacji jednolitych materiałów wybuchowych (Mertuszka, Pytlik 2019).

4. Podsumowanie

Wyniki pomiarów wskazują, że dla wszystkich przeanalizowanych materiałów wybuchowych rozrzut zarejestrowanych prędkości detonacji wokół wartości średniej jest zbliżony, zarówno dla prędkości zmierzonych Explometrem, jak i urządzeniem MicroTrap. Wartości te nie przekraczały 1%, co jest wielkością zawierającą się w granicach błędów pomiarowych zastosowanych systemów pomiarowych. Największą różnicę zarejestrowano dla oktogenu flegmatyzowanego przy pomiarze metodą ciągłą, dla którego niepewność wartości średniej wyniosła niecałe 0,5%. Dla porównania, rozrzut wyników wokół wartości średniej przy metodzie odcinkowej dla oktogenu flegmatyzowanego wyniósł 0,14%.

Pomimo skróconego odcinka rozbiegowego, który wynosił trzy średnice ładunku (40% mniej niż zakłada norma PN-EN 13631-14:2005:), okazała się ona wystarczająca do osiągnięcia przez analizowane materiały wybuchowe poziomu stabilnej detonacji na założonym odcinku pomiarowym. Co prawda zastosowana metodyka badania przy użyciu rejestratora MicroTrap nie pozwala na spełnienie wymagań powyższej normy w zakresie odcinka pomiarowego, który nie powinien być mniejszy niż 10 cm oraz powinien być oddalony od środka inicjującego na określoną w normie odległość, to dzięki wysokiej częstotliwości próbkowania, może być traktowana jako alternatywna metoda oznaczania prędkości detonacji materiałów wybuchowych zgodnie z normą PN-EN 13631-14:2005:.

Niemniej należy mieć na uwadze, że metoda ciągła pozostaje nadal jedyną metodą pomiaru prędkości detonacji górniczych materiałów wybuchowych w otworach strzałowych. Tego typu badania, w przypadku stwierdzenia nieprawidłowości, powinny być sygnałem do wycofania MW z danej szarży i przeprowadzenia jego szczegółowej analizy w warunkach laboratoryjnych. Oczywiście jest, że tego typu procedura będzie ograniczać się do MW nabożowanych, ponieważ parametry użytkowe MWE luzem zmieniają się wraz ze zmianą warunków, w których są stosowane.

Podsumowując, rozrzut wyników pomiarów prędkości detonacji przy zastosowaniu metody ciągłej i odcinkowej dla idealnych materiałów wybuchowych jest niewielki, a dokładność wyników zbliżona.

Treść artykułu oparto o wyniki projektu pt. „Materiały o strukturze nanokrystalicznej i amorficznej do konstrukcji wkładek kumulacyjnych do zastosowania w przemyśle wydobywczym” (NEMATDRILL), nr umowy TECHMATSTRATEG1/349156/13/NCBR/2017 w ramach Programu „Nowoczesne technologie materiałowe” TECHMATSTRATEG.

Literatura

AGRAWAL H., MISHRA A.K. 2017 - A Study on Influence of Density and Viscosity of Emulsion Explosive on Its Detonation Velocity. Modelling, Measurement and Control C, vol. 78, no. 3, pp. 316–336.

ARVANITIDIS I., NYBERG U., OUCHTERLONY F. 2004 - The diameter effect on detonation properties of cylinder test experiments with

emulsion E682. SveBeFo Report No. 66, Stockholm: Swedish Rock Engineering Research.

CHIAPPETTA R.F. 1998 - Blast monitoring instruments and analysis techniques, with an emphasis on field application. *Fragblast – International Journal of Blasting and Fragmentation*, vol. 2, issue 1, pp. 79–122.

DOBRILOVIĆ M., BOHANEK V., ŽGANEC S. 2014 - Influence of explosive charge temperature on the velocity of detonation of ANFO explosive. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 11 (2), pp. 191–197.

HARSH H.K., DWIVEDI R.D., SWARUP A., PRASAD V.V.R. 2005 - Velocity of detonation (VOD) - a review of measurement techniques, *Proceedings of Technological Advancement and Environmental Challenges in Mining and Allied Industries in 21st Century*, pp. 169–175.

MERTUSZKA P., FUŁAWKA K. 2017 - Badania kontrolne parametrów materiałów wybuchowych i środków strzałowych w warunkach ruchowych zakładu górniczego. *Materiały Wysokoenergetyczne*, t. 9, s. 194–203.

MERTUSZKA P., FUŁAWKA K., CENIAN B. 2017a - Pomiar prędkości detonacji ładunków materiałów wybuchowych w warunkach polowych z wykorzystaniem urządzeń Explomet-Fo-2000 oraz MicroTrap. „*Górnictwo Odkrywkowe*”, nr 1/2017, s. 28–34.

MERTUSZKA P., FUŁAWKA K., CENIAN B., KRAMARCZYK B. 2017b - Wpływ sposobu pobudzenia materiału wybuchowego emulsyjnego luzem na prędkość detonacji na przykładzie Emulinitu 8L. „*Przeгляд Górnicy*”, t. 73, nr 5, s. 8–16.

MERTUSZKA P., KRAMARCZYK B. 2018 - The impact of time on the detonation capacity of bulk emulsion explosives based on Emulinit 8L. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 43, issue 8, pp. 799–804.

MERTUSZKA P., SZUMNY M., FUŁAWKA K., MAŚLEJ J., SAIANG D. 2019a - The effect of the blasthole diameter on the detonation velocity of bulk emulsion explosive in the conditions of selected mining panel of the Rudna mine. *Archives of Mining Sciences*, vol. 64 (4), pp. 725–737.

MERTUSZKA P., FUŁAWKA K., PYTLIK M., WINCENCIAK J., WAWRYSZEWICZ A. 2019b - The influence of time on the density and detonation velocity of bulk emulsion explosives – a case study from Polish copper mines. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 16 (2), pp. 245–258.

MERTUSZKA P., PYTLIK M. 2019 - Analysis and comparison of the continuous detonation velocity measurement method with the standard method. *High Energy Materials*, vol. 11 (2), pp. 63–72.

MISHRA A.K., SINHA P.R. 2003 - VOD measurement techniques – a review, *Proceedings of the 15th National Seminar on Explosive and Blasting*, pp. 43–52.

PN-EN 13631-14:2005: Materiały wybuchowe do użytku cywilnego – Materiały wybuchowe kruszące – Część 14: Oznaczanie prędkości detonacji.

PRADHAN M. 2010 - Sleep time: its consequences on performance of bulk emulsion explosive. *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 69 (2), pp. 125–128.

SZASTOK M. 2014 - Nowa metoda pomiaru prędkości detonacji materiałów wybuchowych w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” – porównanie z metodą akredytowaną (wg PN-EN 13631-14:2005), [w:] J. Sobala (red.), *Nowe techniki stosowania materiałów wybuchowych*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, s. 162–166.

WŁODARCZYK E. 2012 - Podstawy fizyki wybuchu. Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa.

ŽGANEC S., BOHANEK V., DOBRILOVIĆ M. 2016 - Influence of a primer on the velocity of detonation of ANFO and heavy ANFO blends. *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 13 (3), pp. 694–704.

Artykuł wpłynął do redakcji – kwiecień 2020
Artykuł akceptowano do druku – 15.06.2020