

POMIAR PRĘDKOŚCI DETONACJI ŁADUNKÓW MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH W WARUNKACH POLOWYCH Z WYKORZYSTANIEM URZĄDZEŃ EXPLOMET-FO-2000 ORAZ MICROTRAP™

FIELD TESTS OF VELOCITY OF DETONATION OF EXPLOSIVES BY THE USE OF EXPLOMET-FO-2000 AND MICROTRAP™ DEVICES

Piotr Mertuszka, Krzysztof Fuławka - KGHM Cuprum sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław
Bogusław Cenian - KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakłady Górnicze Polkowice-Sierszowice, Kaźmierzów

Badania parametrów materiałów wybuchowych nie obejmują szeregu czynników zewnętrznych, które istotnie wpływają na ich zachowanie w warunkach rzeczywistych. Uzasadnione jest zatem prowadzenie pomiarów bezpośrednio w miejscu prowadzenia robót strzałowych w celu określenia ich stabilności i zgodności z parametrami deklarowanymi przez producentów. Jednym z podstawowych i zarazem najczęściej stosowanym parametrem opisującym właściwości materiałów wybuchowych jest prędkość detonacji. W ramach niniejszego opracowania dokonano porównania urządzenia MicroTrap™ kanadyjskiej firmy MREL pozwalającego na ciągły pomiar prędkości detonacji w oparciu o metodę elektryczną oraz urządzenia Explomet-Fo-2000 szwajcarskiej firmy Kontinitro działającego w oparciu o odcinkową metodę elektrooptyczną. W artykule opisane zostały parametry techniczne, możliwości i ograniczenia obydwu systemów oraz przedstawiono przykładowe wyniki badań polowych.

Słowa kluczowe: urządzenia do pomiarów prędkości detonacji, technika strzałowa

The tests of explosive's parameters do not consider a number of external factors, that significantly impact on their behaviour in mining conditions. It is therefore justified to perform the in-situ measurements in order to determine their stability and conformity with parameters declared by the manufacturers. One of the basic and also the most commonly used parameter describing the properties of explosives is the velocity of detonation. In this paper, the following VOD recorders were compared: the MicroTrap™ VOD/Data Recorder from MREL, Canada, which allows for continuous VOD measurements based on electrical method, and Swiss Made – the Explomet-Fo-2000, which is triggered by the light emitted during the detonation. The article describes the technical parameters, possibilities and limitations of both systems as well as selected results of field tests.

Keywords: devices for measuring velocity of detonation, blasting technique

Wprowadzenie

Technika strzałowa jest obecnie podstawową metodą urabiania skał na kruszywo w górnictwie odkrywkowym surowców skalnych. Zamierzony efekt robót strzałowych można uzyskać dobierając właściwy materiał wybuchowy do parametrów fizyko-mechanicznych urabianego ośrodka skalnego. Spośród szeregu parametrów charakteryzujących materiał wybuchowy (MW), najczęściej stosowanym i zarazem najbardziej miarodajnym z punktu widzenia efektywności urabiania jest prędkość detonacji materiału wybuchowego (*ang. Velocity of Detonation*), która opisuje z jaką prędkością wewnątrz ładunku MW przemieszcza się fala detonacyjna. Parametr ten zależy m.in. od średnicy ładunku, jego gęstości czy średnicy otworu strzałowego. Prędkość detonacji jest zwykle wyznaczana w ściśle określonych warunkach. Sposób przeprowadzania tego typu badania został opisany w normie PN-EN 13631-14:2005

– Materiały wybuchowe do użytku cywilnego – Materiały wybuchowe kruszące – Część 14: Oznaczanie prędkości detonacji. Norma szczegółowo przedstawia tryb postępowania w przypadku prowadzenia pomiaru prędkości detonacji, m.in. sposób inicjacji czy schemat instalacji czujników wewnątrz badanego ładunku MW (Szastok, 2015). Jak zaznaczają Batko i Pyra (2010), średnice ładunków w badaniach MW stosowanych w przemyśle górnictwem są zwykle równe lub nieznacznie większe od średnicy krytycznej danego materiału. Oznacza to, że prędkość z jaką MW detonuje w otworze strzałowym może znacznie różnić się od wartości wyznaczonych metodą normową. Według Chiappetta (1998), istnieje szereg czynników *stricte* eksploatacyjnych, które mogą wpływać na prędkość detonacji MW, a których nie uwzględniają badania normowe. Należą do nich m.in.:

- skład MW,
- rodzaj stosowanego uczulacza,

- temperatura otoczenia i urabianych skał,
- rodzaj i wielkość pobudzacza,
- czas od załadunku do odpalenia ładunku MW,
- bliskość średnicy/gęstości krytycznej,
- długość kolumny ładunku MW,
- sposób mieszania komponentów (w przypadku MWE luzem).

Oznacza to, że dla określenia właściwej charakterystyki badanego materiału wybuchowego uzasadnione wydaje się prowadzenie kontrolnych pomiarów prędkości detonacji bezpośrednio w miejscu prowadzenia robót strzałowych, aby określić jej rzeczywistą, eksploatacyjną wartość. W ostatnich latach na rynku pojawiły się urządzenia pozwalające na pomiar prędkości detonacji MW bezpośrednio w otworach strzałowych. Zagadnienie to opisał szczegółowo Suceśka (1995) w opracowaniu na temat metod badań materiałów wybuchowych. Zasadniczo wyróżnić można dwie grupy tego typu urządzeń: do pomiarów ciągłych oraz do pomiarów odcinkowych. Ze względu na mierzony parametr oraz sposób konwersji metody te można podzielić na następujące:

- **metody optyczne** – wykorzystujące wszelkiego rodzaju kamery o bardzo krótkim czasie migawki;
- **metody elektryczne** – wykorzystujące zmiany wielkości elektrycznych, przy czym rejestratorem jest oscyloskop bądź licznik elektryczny;
- **metody elektrooptyczne** – wykorzystujące pomiary światłowodowe, które rejestrowane są przez liczniki elektroniczne.

W ramach niniejszego opracowania przeanalizowano dwie metody pomiaru prędkości detonacji: metodę elektryczną umożliwiającą ciągły pomiar prędkości oraz metodę elektrooptyczną opartą na pomiarze odcinkowym. Do pomiaru ciągłego zastosowano aparaturę MicroTrap™ kanadyjskiej firmy MREL, natomiast do pomiaru odcinkowego – urządzenie Explomet-Fo-2000 produkowanego w Szwajcarii przez firmę KONTINIRO.

Charakterystyka wybranych przenośnych systemów pomiaru prędkości detonacji MW

Charakterystyka urządzenia Explomet-Fo-2000

Explomet-Fo-2000 (rys. 1) jest urządzeniem do pomiaru prędkości detonacji bazującym na metodzie wykorzystującej



Rys. 1. Licznik do pomiaru prędkości detonacji Explomet-Fo-2000
Fig. 1. Explomet-Fo-2000 VOD counter

emisję światła, generowanego przez przemieszczający się front fali detonacyjnej. Rolę czujników pełnią włókna optyczne (linie światłowodowe), którymi sygnały świetlne są przesyłane do rejestratora. Urządzenie umożliwia przeprowadzenie pomiaru prędkości detonacji do wartości maksymalnej 10 000 m/s oraz pozwala na przechowywanie do 100 pomiarów w pamięci wewnętrznej. Wbudowany akumulator pozwala na pracę bez zasilania sieciowego przez okres do 40 godzin. Sondy światłowodowe nie są wrażliwe na zakłócenia elektromagnetyczne. Pomiar czasu realizowany jest z dokładnością na poziomie +/- 0,1 mikrosekundy (10^{-7} s). Aparaturę można umieścić w odległości do 200 metrów od miejsca prowadzenia pomiaru.

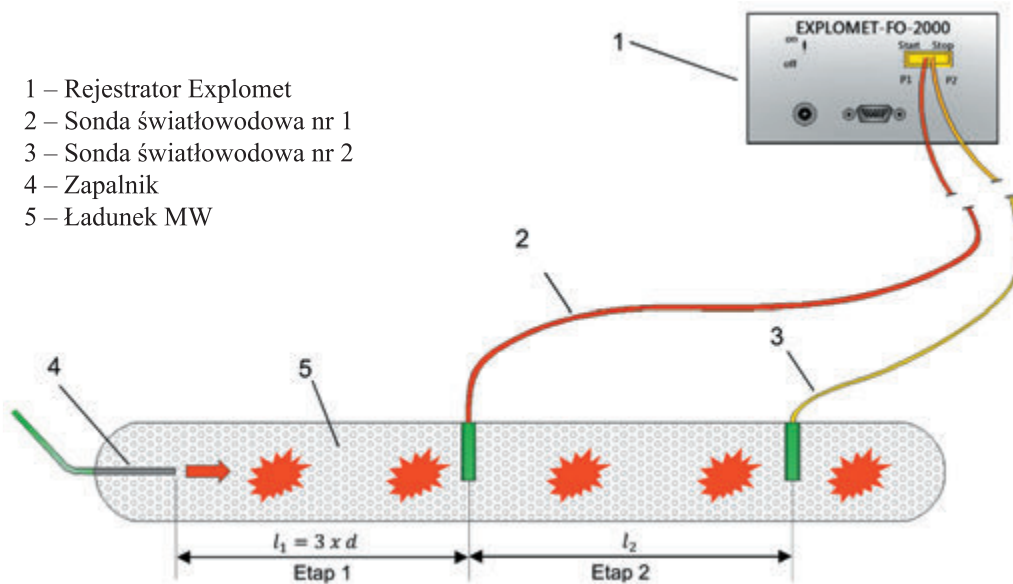
Przy zastosowaniu dodatkowego konektora, do którego podłączyć można 6 niezależnych czujników, system Explomet pozwala na jednoczesny pomiar prędkości detonacji na 5 odcinkach ładunku. W momencie, gdy fala detonacyjna osiąga pierwszy z czujników, natychmiast uruchamiane są kolejne liczniki czasu. Następnie każda pobudzona w powyższy sposób sonda zatrzymuje swój czasomierz. Wyniki pomiaru prędkości detonacji wyświetlane są bezpośrednio na ekranie rejestratora. Urządzenie można stosować zarówno do pomiaru prędkości detonacji, jak i do pomiaru samego czasu, co jest przydatne np. przy badaniu opóźnień poszczególnych stopni zapalników. Rysunek 2 przedstawia układ pomiarowy systemu Explomet przy użyciu dwóch sond pomiarowych. Pierwsze włókno optyczne umieszcza się w ładunku MW w odległości równej co najmniej trzem średnicom ładunku licząc od miejsca pobudzenia. Przy badaniach prowadzonych zgodnie z normą PN-EN 13631-14:2005, pierwszy czujnik należy umieścić w odległości minimum pięciu średnic badanego ładunku, natomiast wspomniana wyżej odległość trzech średnic jest minimalną odległością określoną przez producenta urządzenia, która zapewnia eliminację wpływu środka inicjującego na wynik pomiaru. Kolejne sondy natomiast umieszcza się w równych odstępach, jednak nie mniejszych niż 10 cm od sondy poprzedniej przemieszczając się zgodnie z kierunkiem detonacji. W trakcie prowadzonych badań odległość pomiędzy sondami wynosiła 30 cm.

Prędkość detonacji obliczana jest z poniższej zależności:

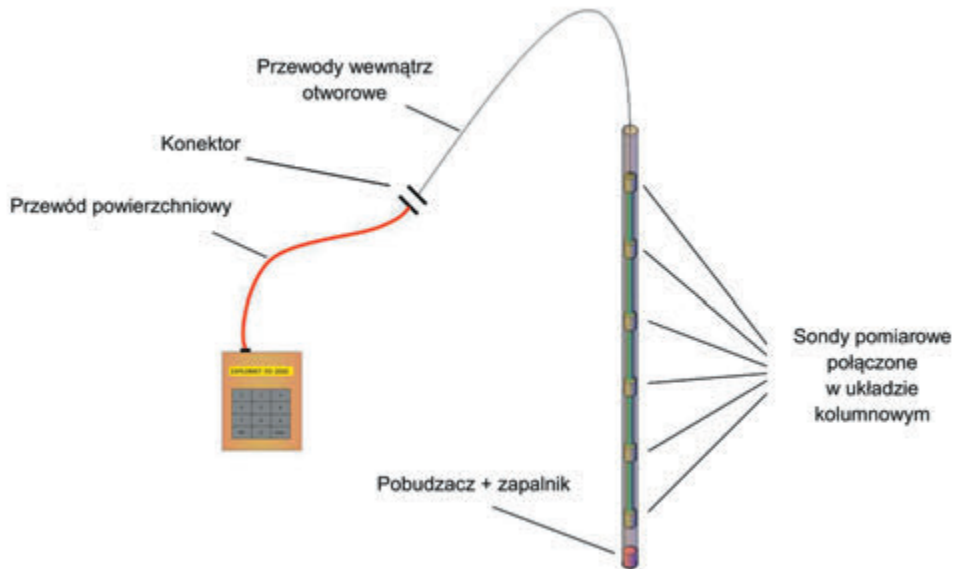
$$VOD = \frac{l}{t} [m/s] \quad (1)$$

gdzie: VOD – prędkość detonacji ładunku MW, [m/s];
 l – odległość pomiędzy sondami/czujnikami pomiarowymi, [m];
 t – czas pokonania przez falę detonacyjną odległości między czujnikami, [s].

System rejestracji Explomet, ze względu na swą budowę, znajduje zastosowanie w oznaczaniu prędkości detonacji ładunków przyłożonych oraz wszelkiego rodzaju badań poza otworami strzałowymi. Oznacza to, że jego bezpośrednie zastosowanie w warunkach rzeczywistych prowadzenia robót strzałowych jest ograniczone. Istnieje jednak możliwość zastosowania opcjonalnego rozszerzenia systemu o nazwie *EasyProbe*, który umożliwia prowadzenie pomiarów wewnątrz otworu strzałowego. System *EasyProbe* (rys. 3) umożliwia pomiar prędkości detonacji kolumny MW na odcinku do 3 m, przy czym najdłuższy odcinek sondy (najniżej położony punkt pomiarowy) nie może przekraczać 25 m od miejsca położenia specjalnego konektora powierzchniowego. Narzędzie tego typu jest jednorazowe ponieważ wszystkie elementy systemu zostają całkowicie zniszczone w trakcie



Rys. 2. Sposób pomiaru prędkości detonacji przy wykorzystaniu systemu Explomet
Fig. 2. Method of VOD measurement using the Explomet counter



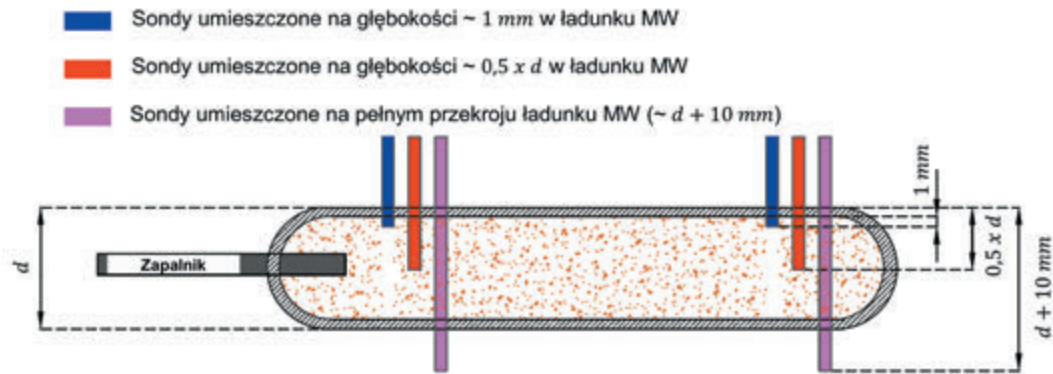
Rys. 3. System EasyProbe przy współpracy z rejestratorem Explomet
Fig. 3. EasyProbe system in conjunction with the Explomet counter

przewodzenia pomiaru. Ten sposób pomiaru powoduje znaczny wzrost kosztów jednostkowych badań. Problemem może okazać się także odległość pomiędzy konektorem powierzchniowym i rejestratorem, która nie może przekroczyć 50 m. Takie rozwiązanie zwiększa ryzyko uszkodzenia rejestratora w wyniku przemieszczających się brył skalnych, gdyż łączna długość systemu *EasyProbe* i przewodu łączącego konektor z rejestratorem pozwala na umiejscowienie aparatury maksymalnie 75 metrów od pierwszej sondy. Dlatego też, za każdym razem należy zapewnić maksymalną ochronę aparatury przed wykonaniem pomiarów.

Jak zaznacza Dobrilović i in. (2014), wyniki pomiarów prędkości detonacji uzyskane przy pomocy systemu Explomet charakteryzują się dużym rozrzutem wartości sięgającym nawet kilkuset m/s. Jego zdaniem na dokładność pomiaru wpływają m.in. odległość między sondami i dokładność jej określenia, dokładność pomiaru czasu, a przede wszystkim sposób instalacji sond w próbach ładunków materiałach wybuchowych. Chodzi mianowicie o to, jak głęboko w ładunku MW

jest umieszczona końcówka sondy, tzn. na pełnym przekroju, w połowie próby czy na jej obwodzie, co przedstawiono na rysunku 4.

Badania wykazały, że największy wpływ na dokładność pomiaru ma sposób umieszczenia sondy w ładunku materiału wybuchowego. Najbardziej stabilne wyniki zaobserwowano przy bardzo niewielkim zagłębieniu sond pomiarowych w badanym materiale. W przypadku saletroli maksymalna różnica w zarejestrowanych prędkościach detonacji dla konfiguracji oznaczonej na rysunku 4 kolorem czerwonym wyniosła ponad 500 m/s, natomiast 40% pomiarów nie mieściło się w zakresie odchylenia standardowego, tj. 160 m/s. Wariant oznaczony kolorem fioletowym cechował się mniejszą różnicą w oznaczonych prędkościach detonacji, jednak rozrzut nadal pozostawał na poziomie kilkuset m/s. Najmniejszą różnicę między wynikami uzyskano przy bardzo niewielkim zagłębieniu sond w badanym materiale (wariant oznaczony kolorem niebieskim), gdzie rozrzut poszczególnych wartości prędkości detonacji mieścił się w przedziale kilkudziesięciu m/s.



Rys. 4. Sposoby umieszczania sond w ładunku MW analizowane przez Dobrilovića (2014)
 Fig. 4. Methods of probes installation in explosive's charge analyzed by Dobrilović (2014)

Charakterystyka urządzenia MicroTrap™

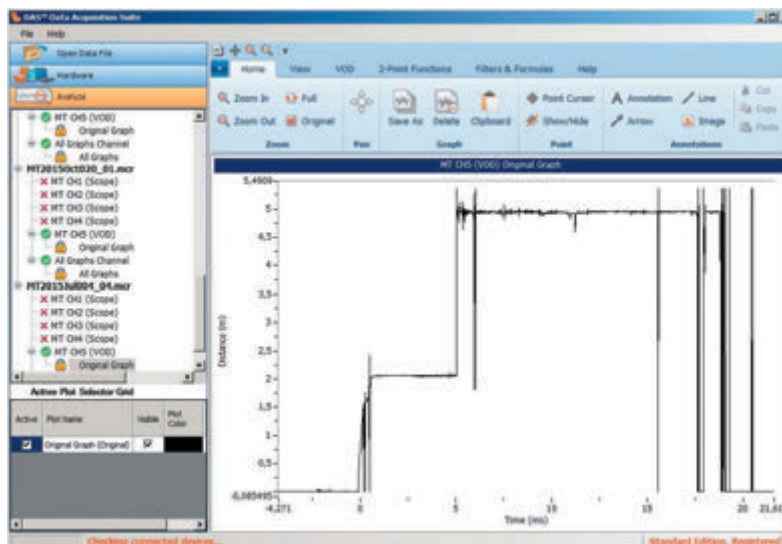
Rejestrator MicroTrap (rys. 5) jest jednokanałowym przenośnym urządzeniem do pomiaru prędkości detonacji ładunków materiałów wybuchowych, który pozwala na ciągły pomiar prędkości detonacji wewnątrz otworów strzałowych. Rejestrator MicroTrap umożliwia także prowadzenie pomiarów prędkości detonacji ładunków krótkich nie znajdujących się w otworach strzałowych, tj. o długości nie przekraczającej jednego metra. Do tego typu badań przeznaczone są specjalne sondy o długości 100 cm dla otworów krótkich i 30 cm dla otworów bardzo krótkich. System ten może być z powodzeniem stosowany zarówno do pomiarów prędkości detonacji w długich otworach strzałowych w kopalniach odkrywkowych, jak i w otworach krótkich w kopalniach podziemnych (Cenian i in., 2015). Rolę sondy pomiarowej pełni kabel koncentryczny o standardowej budowie kabli typu RG lub rurka koncentryczna w przypadku badania ładunków krótkich. Zainstalowana pamięć wewnętrzna urządzenia pozwala na zapis danych z 4 milionów punktów pomiarowych, przy maksymalnej rozdzielczości na poziomie 2 MHz. Oznacza to, że sygnał próbkowany jest z dokładnością na poziomie 0,5 mikrosekundy. Sondę przymocowuje się naboju udarowego, a następnie opuszcza na dno otworu. Ponieważ koniec sondy zlokalizowany na dnie otworu strzałowego jest zwarty, czoło fali detonacyjnej przemieszczającej się wewnątrz ładunku MW powoduje jej skracanie, a tym samym zmianę oporności. Urządzenie rejestruje zmianę oporności na całej dłu-



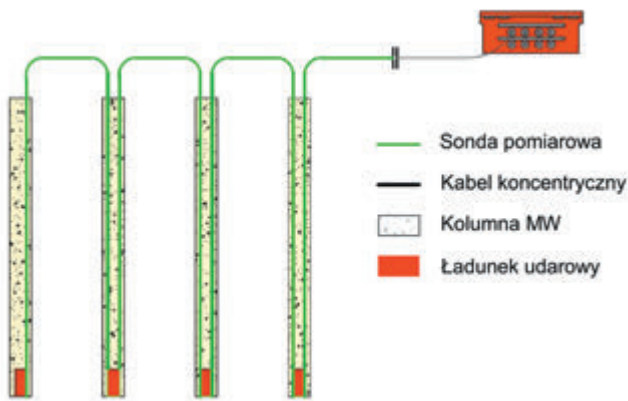
Rys. 5. Urządzenie MicroTrap (z lewej) oraz sonda pomiarowa (z prawej)
 Fig. 5. MicroTrap VOD recorder (left) and VOD ProbeCable (right)

gości otworu strzałowego. Zmiana ta rejestrowana jest w funkcji czasu, a następnie przeliczana na prędkość detonacji.

Po zakończeniu pomiaru zarejestrowane dane przesyłane są do komputera, gdzie przy użyciu odpowiedniej aplikacji mogą zostać szczegółowo przeanalizowane (nie ma możliwości podglądu zarejestrowanej prędkości na ekranie urządzenia). Załączony pakiet oprogramowania DAS™ Data Acquisition Suite (rys. 6) pozwala na przeprowadzanie konwersji zarejestrowanych sygnałów napięcia prądu stałego na prędkość i analizę przebiegów zarejestrowanej prędkości detonacji MW. Pakiet DAS™



Rys. 6. Panel główny aplikacji DAS™
 Fig. 6. Main screen of DAS™ Data Acquisition Suite software



Rys. 7. Sposób pomiaru prędkości detonacji w kilku otworach przy użyciu urządzenia MicroTrap

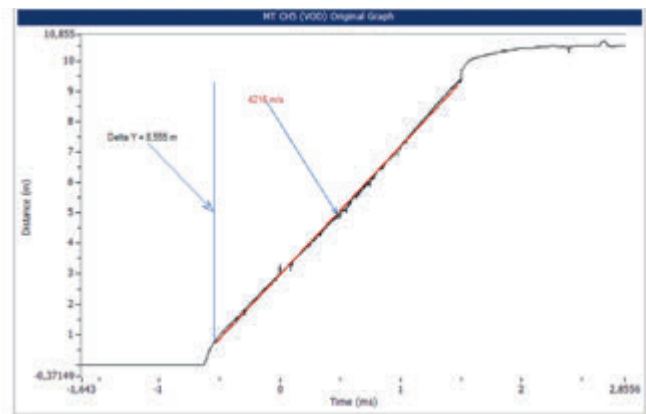
Fig. 7. Method of VOD measurements for multiple blasthole recording using MicroTrap recorder

umożliwia także konfigurację urządzenia przed rozpoczęciem pomiaru, w tym m.in. określenie ilości pomiarów, częstotliwości próbkowania, a także sposobu i poziomu wzbudzenia, tj. poziomu zmiany oporności uruchamiającego rejestrację. Oprogramowanie pozwala także na wyświetlanie, analizowanie, drukowanie oraz eksport danych uzyskanych w czasie pomiarów. Daje to możliwość szczegółowego analizowania zmian prędkości detonacji na całej długości kolumny ładunku MW.

System rejestracji MicroTrap umożliwia także prowadzenie pomiarów prędkości detonacji w kilku otworach strzałowych jednocześnie. Montaż przewodu pomiarowego należy rozpocząć od otworu o najniższym stopniu opóźnienia, a następnie przekładać go do kolejnych otworów zgodnie z zastosowanymi stopniami opóźnienia, co przedstawiono na rysunku 7. Każdy z otworów poza pierwszym otworem będzie wymagał podwójnej długości przewodu pomiarowego w celu zapewnienia ciągłości linii pomiarowej w trakcie prowadzenia pomiaru. W przypadku tego typu badań maksymalna długość sondy pomiarowej może osiągnąć nawet 900 m, co oznacza, że pomiary mogą być realizowane w kilku otworach strzałowych jednocześnie.

Pomiary połowe prędkości detonacji MW

Połowe pomiary prędkości detonacji materiałów wybuchowych przeprowadzono na terenie jednej z dolnośląskich kopalń bazaltu oraz na terenie zakładowego placu badania MW firmy NITROERG S.A. w Bieruniu. Do badania w długich otworach strzałowych wykorzystano urządzenie MicroTrap z sondą pomiarową o oporności jednostkowej 10,80 Ohm/m. Sondę umieszczono w otworze strzałowym o najniższym stopniu opóźnienia (otwór zewnętrzny pierwszego rzędu) w celu zminimalizowania ryzyka urwania sondy w wyniku przemieszczających się brył skalnych. Do otworów załadowano materiał wybuchowy emulsyjny luzem Hydromite 70 produkowany przez firmę Austin Powder. Kolumna MW została podzielona na dwie części i oddzielona przybitką. Stopnie opóźnienia pierwszej i drugiej części kolumny MW wynosiły odpowiednio 25 i 42 ms. Pomiar prędkości detonacji zarejestrowano na długości ponad 8,5 metra od dna otworu strzałowego. Wykres prędkości detonacji pierwszej części kolumny MW przedstawia rysunek 8. Średnia pomierzona wartość wyniosła 4 216 m/s. Badany materiał wybuchowy osiągnął stabilną wartość prędkości w odległości ok. 20 cm od dna otworu strzałowego. Prędkość detonacji przebadanego MWE osiągnęła minimalną wartość



Rys. 8. Wykres prędkości detonacji MW Hydromite 70 w otworze strzałowym

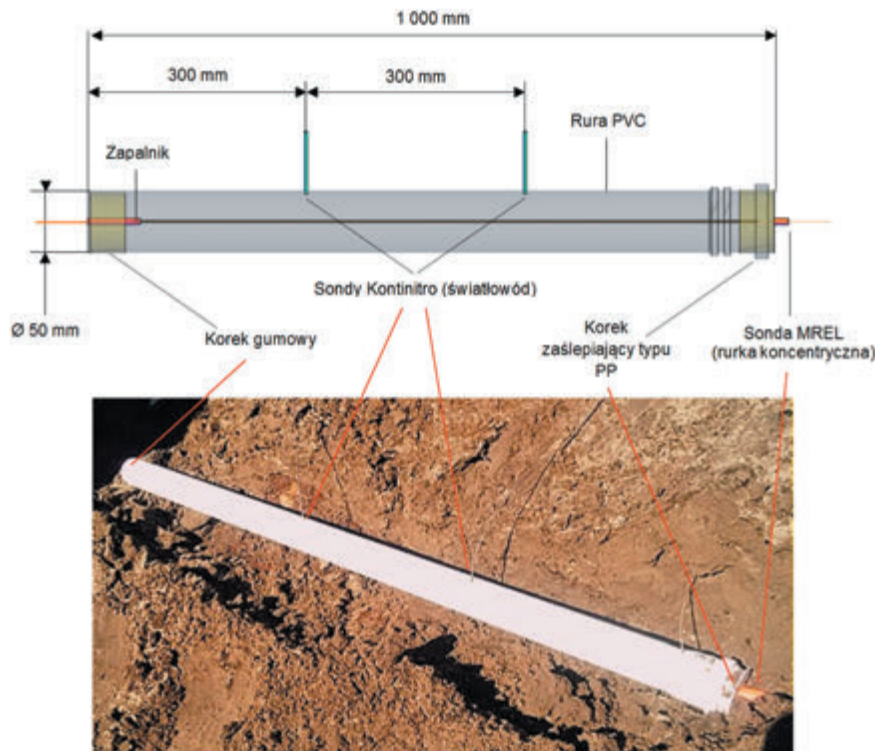
Fig. 8. VOD plot of Hydromite 70 in blasthole

spełniającą deklarację jakości producenta, tj. >4000 m/s. Z uwagi na jednakowy stopień opóźnienia zastosowany dla całego rzędu otworów strzałowych, przeprowadzenie pomiaru prędkości detonacji w kolejnych otworach strzałowych nie było możliwe.

Otrzymany zapis prędkości detonacji jest na tyle stabilny, że może ona zostać wyznaczona zarówno metodą regresji liniowej, jak i metodą dwóch punktów, tj. początkowego i końcowego. Niestety z uwagi na brak odpowiedniej aparatury pomiarowej, niemożliwe było przeprowadzenie badania prędkości detonacji w długim otworze strzałowym przy użyciu systemu Explomet.

Dla porównania dwóch analizowanych systemów pomiaru prędkości detonacji przeprowadzono równoległe badania prób ładunków MW emulsyjnego luzem napełniając nim rury tworzywowe z PVC o średnicy wewnętrznej 50 mm, długości 1000 mm i grubości ścianki 1,8 mm. Przedmiotem badań był materiał wybuchowy emulsyjny luzem typu Emulinit 8L produkowany przez firmę Nitroerg S.A. Elaborację prowadzono przy użyciu Modułowego Urządzenia Pompującego. Po załadowaniu rur materiałem wybuchowym emulsyjnym i odczekaniu, gdy matryca MW wymieszana z uczulaczem zaczynała zwiększać swoją objętość w wyniku zachodzenia reakcji chemicznej i tworzenia się mikropęcherzyków gazu, jego nadmiar usuwano poprzez wyrównanie do poziomu krawędzi rur. Do badań zastosowano sondę pomiarową w postaci rurki koncentrycznej o długości 100 cm i oporności jednostkowej 331,7 Ohm/m, którą umieszczano wzdłuż osi ładunku. Następnie tak przygotowane próby uzbrajano zapalnikiem elektrycznym skalnym natychmiastowym. Dodatkowo wykonano dwa otwory do umieszczenia sond światłowodowych współpracujących z urządzeniem Explomet. Schemat instalacji sond pomiarowych oraz widok próby przedstawiono na rysunku 9.

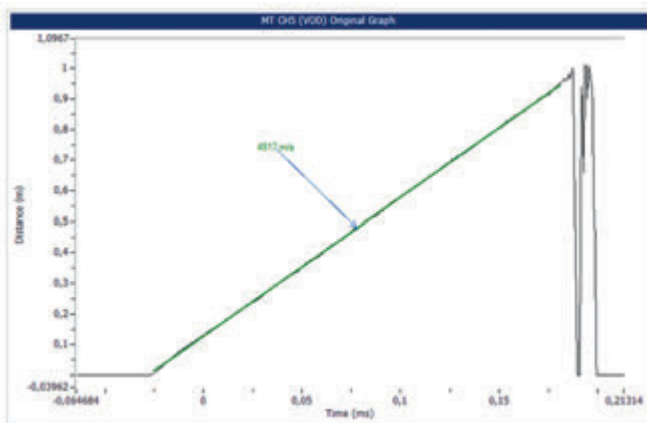
W celu uśrednienia wyników pomiarów wykonywano odstrzał 3 sztuk ładunków, w krótkim odstępie czasu (nie przekraczającym 5 minut) po sobie. Wartości prędkości zarejestrowane przy użyciu rejestratora MicroTrap i wyznaczone metodą regresji liniowej wyniosły dla pierwszej i drugiej próby 4517 m/s, a dla próby trzeciej 4466 m/s. Jeden z wykresów zarejestrowanej prędkości przedstawia rysunek 10. Wyniki pomiarów przeprowadzonych urządzeniem Explomet wyniosły 4512 m/s dla pierwszej próby oraz 4063 m/s dla próby drugiej. Oznaczenie prędkości detonacji dla trzeciej próby nie powiodło się.



Rys. 9. Schemat instalacji sond pomiarowych w rurze plastikowej
Fig. 9. Scheme of probes installation in plastic tube

Przeprowadzona seria pomiarów prędkości detonacji ładunków MW z jednoczesnym wykorzystaniem dwóch testowanych urządzeń wskazuje na pewne ograniczenia obu metod. System rejestracji MicroTrap pozwala na śledzenie zmian prędkości detonacji na całej długości ładunku, co pozwala na sprawdzenie m.in. prawidłowości wypełnienia otworów strzałowych. Nie jest natomiast możliwy odczyt wyniku pomiaru bezpośrednio

pomiarowych w próbce. Przeprowadzona analiza wskazuje, że wyniki mogą charakteryzować się nie tylko dużym rozrzutem, ale możliwe jest również całkowite niepowodzenie pomiaru, co zdarza się stosunkowo często. Dodatkowymi zaletami systemu rejestracji MicroTrap jest także możliwość prowadzenia pomiarów dokładności czasu opóźnienia zapalników, określanie zdolności przenoszenia detonacji pomiędzy ładunkami materiału wybuchowego, określanie minimalnej wielkości pobudzacza dla różnych materiałów wybuchowych poprzez pomiar prędkości rozbiegu, czy określenie wpływu obecności wody, zwiercin, kawałków skał itp. znajdujących się na całej długości kolumny MW na prędkość detonacji. Szczegółowe porównanie obu systemów pomiarowych przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 10. Wykres prędkości detonacji MW Emulinit 8L w rurze tworzywowej
Fig. 10. VOD plot of Emulinit 8L in plastic pipe

po przeprowadzeniu badania. W tym celu konieczne jest przeniesienie danych do komputera posiadającego odpowiednie oprogramowanie. Rozrzut otrzymanych wyników badań jest niewielki. Wartości zmierzonych w pierwszej i drugiej próbie prędkości detonacji są jednakowe, a wartość zmierzona w trzeciej próbie jest o ok. 1% mniejsza. W przypadku systemu Explomet jest możliwe wyłącznie określenie średniej prędkości detonacji na określonym odcinku pomiędzy sondami pomiarowymi, jednak nie ma możliwości analizowania jej zmian na tym odcinku. Możliwy jest natomiast natychmiastowy odczyt wyniku pomiaru na wyświetlaczu urządzenia. Dokładność pomiaru zależy w dużej mierze od sposobu umieszczenia sond

Podsumowanie

Nowatorskie metody pomiaru prędkości detonacji ładunków MW pozwalają na ich wykonywanie bezpośrednio w miejscu prowadzenia robót strzałowych, tj. w warunkach ruchowych zakładu górniczego. Ponadto są one prowadzone bezkolizyjnie, tzn. nie zaburzają normalnego cyklu technologicznego kopalni. Okresowe badania połowe materiałów wybuchowych pozwalają określić, na ile wartości pomierzone pokrywają się z danymi deklarowanymi przez producentów oraz pozwalają na sprawdzenie czy dany MW jest w danych warunkach eksploatacyjnych stabilny tj. nie zmienia swoich parametrów użytkowych wraz ze zmianą warunków w których jest stosowany. W niniejszym opracowaniu przeanalizowano dwie metody pomiaru prędkości detonacji: metodę odcinkową, elektrooptyczną (system Explomet) oraz ciągłą metodę elektryczną (system MicroTrap). W wyniku analizy stwierdzono, że:

- Dokładność pomiaru systemem Explomet jest uzależniona od umiejętności umieszczenia sond w badanym materiale wybuchowym.
- Aparatura Explomet umożliwia prowadzenie badań MW *in*

Tab. 1. Porównanie wybranych parametrów analizowanych systemów pomiarowych
 Tab. 1. Comparison of selected parameters of analyzed measuring systems

PARAMETR	MicroTrap™ (MREL)	EXPLOMET-FO-2000 (KONTINITRO)
Sposób pomiaru	Pomiar zmiany oporności (elektryczny) Pomiar czasu przejścia fali świetlnej (elektrooptyczny)	
Możliwość pomiarów ciągłych	✓	✗
Możliwość pomiaru próbek krótkich (<1m)	✓	✓
Możliwość pomiaru prędkości detonacji bezpośrednio w otworach strzałowych	✓	Tylko przy zastosowaniu dodatkowego systemu EasyProbe
Możliwość pomiaru w otworach długich (>6m)	✓	✗
Możliwość natychmiastowego odczytania wyników	Po podłączeniu do komputera	✓
Możliwość wykonania pomiaru w kilku otworach strzałowych	✓	✗
Czas pracy na zasilaniu własnym	12 h	40 h
Dostępna pamięć	16 pomiarów	100 pomiarów
Dokładność pomiaru czasu	+/- 0,5 μs	+/- 0,1 μs

situ ze względu na prostotę użycia, własne zasilanie i niewielkie gabaryty, jednak sama w sobie nie daje możliwości wyznaczenia prędkości detonacji w otworach strzałowych. Aby wykonać pomiary prędkości detonacji w otworach strzałowych niezbędne jest zastosowanie dodatkowego rozszerzenia systemu EPS.

- Wyniki pomiarów urządzeniem Explomet charakteryzują się dużym rozrzutem zmierzonych prędkości detonacji, co może wynikać z niewłaściwego umieszczenia sond pomiarowych w badanym ładunku.
- Urządzenie MicroTrap umożliwia ciągły pomiar prędkości detonacji MW znajdującego się w otworze strzałowym.
- Urządzenie MicroTrap charakteryzuje się bardzo małym

rozrzutem zmierzonych prędkości detonacji, co pozwala na dokładną korelację prędkości detonacji z analizowanym parametrem np. średnica otworu.

- W systemie MicroTrap łatwość montażu sondy pomiarowej, a także możliwość umieszczenia rejestratora w stosunkowo dużej odległości od miejsca detonacji, umożliwiają szybkie, dokładne, i co najważniejsze, bezpieczne wykonanie pomiarów.
- System MicroTrap pozwala na zastosowanie do 900 metrów bieżących sondy pomiarowej w trakcie jednego pomiaru, co umożliwia pomiar prędkości detonacji w kilku długich otworach podczas jednego odstrzału.

Literatura

- [1] Batko Paweł, Pyra Józef. *Pomiar prędkości detonacji MW w otworze strzałowym z zastosowaniem aparatury MicroTrap*. Górnictwo i Geoinżynieria, 2010, R. 34, z. 4: 57-66. ISSN 1732-6702
- [2] Cenian Bogusław, Mertuszka Piotr, Pytel Witold. *Pilotażowe pomiary prędkości detonacji materiałów wybuchowych w warunkach kopalń KGHM*. CUPRUM Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud, 2015, nr 4 (77): 145-157. ISSN 0137-2815
- [3] Chiappetta R. Frank. *Blast monitoring instruments and analysis techniques, with an emphasis on field application*. Fragblast – International Journal of Blasting and Fragmentation, 1998, Vol. 2: 79-122. ISSN 1385-514X
- [4] Dobrilović Mario, Bohanek Vječislav, Škrlec Vinko. *Increasing measurement accuracy in electro-optical method for measuring velocity of detonation*. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 2014, vol. 29: 49-55. ISSN 0353-4529
- [5] Norma PN-EN 13631-14:2005: *Materiały wybuchowe do użytku cywilnego – Materiały wybuchowe kruszące – Część 14: Oznaczanie prędkości detonacji*. Polski Komitet Normalizacyjny
- [6] Suceska Muhamed, *Test Methods for Explosives*, Springer-Verlag New York, 1995, ISBN 978-0-387-94555-2
- [7] Szastok Michał. *Nowa metoda pomiaru prędkości detonacji materiałów wybuchowych*. Wiadomości Górnicze, 2015, R. 66, nr 4: 213-216. ISSN 0043-5120

W dniu 29 marca 2017 roku w kopalni „Polkowice-Sieroszowice” podczas oględzin zbiornika retencyjnego urobku doszło do tragicznego wypadku, w wyniku którego śmierć poniósł nadsztygar techniki strzałowej – pan mgr inż. Bogusław Cenian, współautor niniejszego artykułu.
 Wybitny specjalista-praktyk w zakresie techniki strzałowej, ratownik górniczy, wzór człowieka, pracownika i przełożonego.
 Na zawsze pozostanie w naszej pamięci.
 Przyjaciele