

Paweł Batko, Józef Pyra**

POMIAR PRĘDKOŚCI DETONACJI MW W OTWORZE STRZAŁOWYM Z ZASTOSOWANIEM APARATURY MICROTRAP

1. Wprowadzenie

Prędkość detonacji jest parametrem najczęściej wykorzystywanym do charakteryzowania właściwości różnych rodzajów materiałów wybuchowych (MW). Jej wartość tabelaryczna podawana jest zwykle z obliczeń lub pomiarów w warunkach laboratoryjnych. W tym drugim przypadku, średnica ładunków jest zwykle równa lub zbliżona do średnicy krytycznej. W takim przypadku zmierzona wielkość prędkości detonacji może nawet znacznie różnić się od rzeczywiście występującej przy detonowaniu ładunków w warunkach przemysłowych. Najlepszą informacją charakteryzującą możliwości MW jest więc wartość prędkości detonacji zmierzona w otworze podczas wykonywanych robót strzałowych [8].

Detonacja najczęściej definiowana jest jako jedna z odmian wybuchu, która przebiega ze stałą, największą z możliwych dla danego MW i dla danych warunków prędkością, przewyższającą prędkość dźwięku w danym niezaburzonym materiale. Równomierność prędkości podtrzymywana jest dzięki energii cieplnej reakcji chemicznych zachodzących w strefie reakcji za czołem fali detonacyjnej. Dla danego materiału wybuchowego prędkość detonacji, stała w określonych warunkach, stanowi jedną z jego podstawowych charakterystyk [7].

2. Czynniki wpływające na prędkość detonacji

Prędkość detonacji, jako jeden z najważniejszych parametrów charakteryzujących MW, zależy od wielu czynników, które w większym lub mniejszym stopniu wpływają na jej wartość.

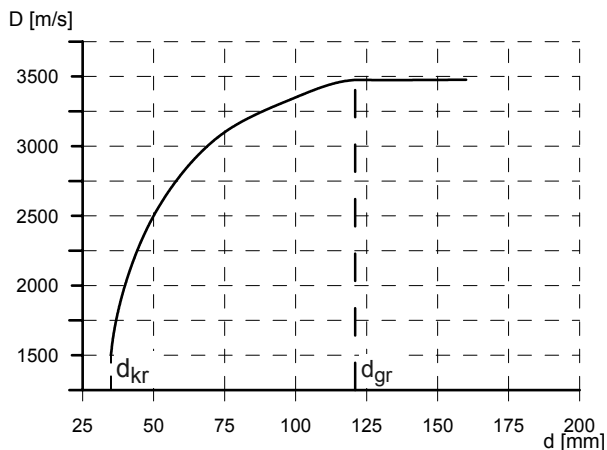
* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Oprócz rodzaju i składu chemicznego MW, do czynników mających wpływ na wartość prędkości detonacji należą:

- średnica ładunku,
- gęstość MW w ładunku,
- wielkość cząstek MW oraz trwałość i rodzaj otoczka ładunków.

2.1. Średnica ładunku

Przyjmuje się, że dla każdego materiału wybuchowego istnieje pewna minimalna średnica ładunku cylindrycznego, tak zwana średnica krytyczna d_{kr} , przy której detonacja ładunku MW występuje każdorazowo (przy użyciu inicjatora o odpowiedniej charakterystyce), ale poniżej której detonacja nie następuje lub następuje nie za każdym razem. Wraz ze zwiększeniem średnicy ładunku powyżej krytycznej, prędkość detonacji wzrasta, osiągając wartość maksymalną przy pewnej granicznej średnicy d_{gr} (rys. 1), charakterystycznej dla danego MW i konkretnych warunków przeprowadzania badań [1, 6].

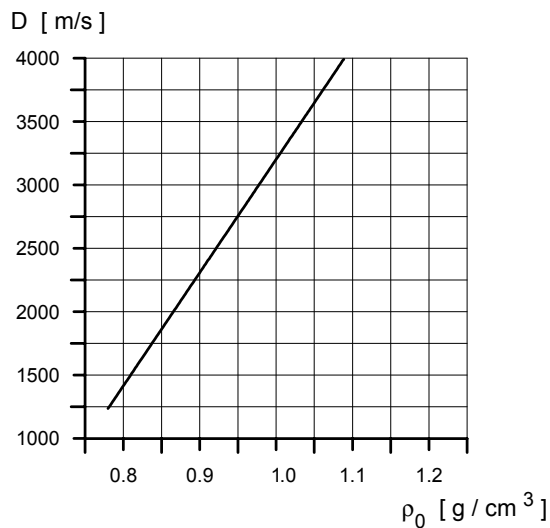


Rys. 1. Zależność prędkości detonacji MW od średnicy ładunku

Wartość d_{gr} i odpowiadająca jej maksymalna prędkość detonacji, może być wyznaczona, zarówno eksperymentalnie jak i teoretycznie, jedynie dla materiałów wybuchowych homogenicznych, o silnie zaznaczonych właściwościach wybuchowych. Jeżeli chodzi o mieszaniny wybuchowe heterogeniczne, to również obserwuje się bardzo dużą zależność prędkości detonacji od średnicy ładunku.

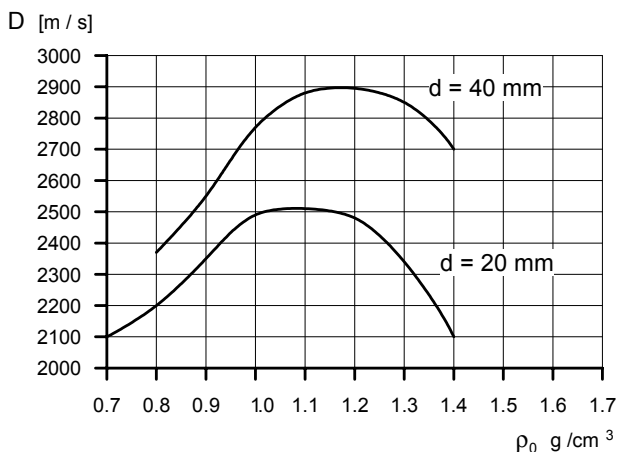
2.2. Gęstość MW w ładunku

Duży wpływ na prędkość detonacji ma gęstość MW w ładunku ρ_0 . W przypadku MW jednorodnych (związków chemicznych), ze zwiększeniem gęstości, prędkość detonacji rośnie prawie liniowo (rys. 2), aż do gęstości substancji w postaci krystalicznej [4, 6].



Rys. 2. Zależność prędkości detonacji od gęstości dla MW jednorodnych [4]

W przypadku MW w postaci mieszanin, dla stałej średnicy, prędkość detonacji wzrasta osiągając maksimum dla pewnej gęstości granicznej, a przy dalszym zagęszczaniu materiału maleje, aż do całkowitego zaniku zdolności do detonacji. Z rysunku 3 wynika, że dla tego samego MW, przy zwiększeniu średnicy (w przedziale pomiędzy wielkościami krytyczną i graniczną), następuje wzrost prędkości detonacji do wyższej wartości maksymalnej, przy jednoczesnym wzroście gęstości granicznej [4].



Rys. 3. Zależność prędkości detonacji od gęstości MW wieloskładnikowych [6]

Jak wynika także z rysunku 3, zmiana gęstości ładunku MW ma istotny wpływ na prędkość detonacji. Jednak możliwości jej regulowania w miejscu wykonywania robót strzałowych, pojawiły się dopiero w momencie wprowadzenia do użytku materiałów wybuchowych emulsyjnych (MWE), nagazowywanych chemicznie podczas mechanicznego załadunku do otworów strzałowych. W tym przypadku, pod wpływem ciężaru słupa MWE, w dolnej części ładunku w otworze następuje sprężenie mikropęcherzyków gazu, co powoduje pewien wzrost gęstości MW. Ze wzrostem gęstości ładunku MW maleje jednak między innymi jego wrażliwość na inicjację, a nawet zanik zdolności do detonacji [1].

W materiałach jednorodnych, przy zwiększaniu gęstości danego MW, oprócz zmiany prędkości detonacji, następuje zmniejszanie się średnicy krytycznej oraz granicznej. Gdy gęstość MW zbliża się do gęstości cechującej stan krystaliczny, następuje niewielki wzrost d_{kr} i wyrównanie wielkości obu charakterystycznych średnic tak, że wtedy średnica krytyczna jest równa średnicy granicznej ($d_{kr} = d_{gr}$) [5].

2.3. Wielkość cząstek MW oraz otoczka ładunków

Rozdrobienie cząstek MW poprawia ich właściwości, ponieważ liczba aktywnych punktów w strefie pobudzenia wzrasta. Zmniejsza się czas spalania poszczególnych cząstek, co prowadzi do obniżenia średnicy krytycznej i granicznej. Dobrym przykładem może być tutaj porównanie saletrolu (ANFO) i MWE. W ANFO utleniacz — saletra amonowa ma ziarna o średnicy około 2 mm, a w MWE utleniacz — roztwór saletry posiada ziarna o średnicy około 0,005 mm. W obu przypadkach ziarna pokryte są olejem. Jednak kontakt paliwa z utleniaczem w MWE jest o wiele większy niż w ANFO, co wpływa na przyspieszenie przebiegu reakcji [4].

Wpływ otoczki na prędkość detonacji MW kruszących przejawia się w sposób wyraźny przy niewielkich średnicach i małych gęstościach, natomiast przy dużych gęstościach i średnicach ładunku, wpływ jest nieznaczny. Otoczka o dowolnej trwałości nie powoduje wzrostu prędkości detonacji, jeśli średnica ładunku jest większa od granicznej [6].

3. Pomiar prędkości detonacji z zastosowaniem aparatury MicroTrap

Urządzenie MicroTrap (rys. 4) wyprodukowane przez kanadyjską firmę MREL, jest stosowane do pomiaru prędkości detonacji VOD (ang. *velocity of detonation*). Jest wygodnym, przenośnym i prostym w obsłudze urządzeniem [8].

Cała aparatura składa się z głównego urządzenia (rys. 4), które posiada własną pamięć i w niej bezpośrednio zapisywane (rejestrowane) są wszystkie dane. Dodatkowo w wyposażeniu znajdują się: zasilacz, kabel komunikacyjny LPT oraz USB, kabel koncentryczny typu RG-58 koloru czarnego (dla łączenia przewodu sondy z rejestratorem) oraz zielony, ekranowany przewód — sonda, który podczas przeprowadzania pomiarów umieszczany jest bezpośrednio w ładunku MW. Wyniki pomiarów analizowane są przy użyciu programu MicroTrap, który należy zainstalować w komputerze.



Rys. 4. Aparatura MicroTrap [3]

Pomiar wykonany będzie przez aparaturę samoczynnie. Po zarejestrowaniu pomiarów, wyniki z pamięci MicroTrap, można przetransmitować do komputera stacjonarnego.

Analiza wyników pomiarów prowadzona jest według licencjonowanego programu MREL-MicroTrap (rys. 5).



Rys. 5. Oprogramowanie MicroTrap

Wynikiem analizy jest ustalenie prędkości pomiędzy dwoma wybranymi punktami, czas trwania procesu oraz długości odcinka przebiegu detonacji.

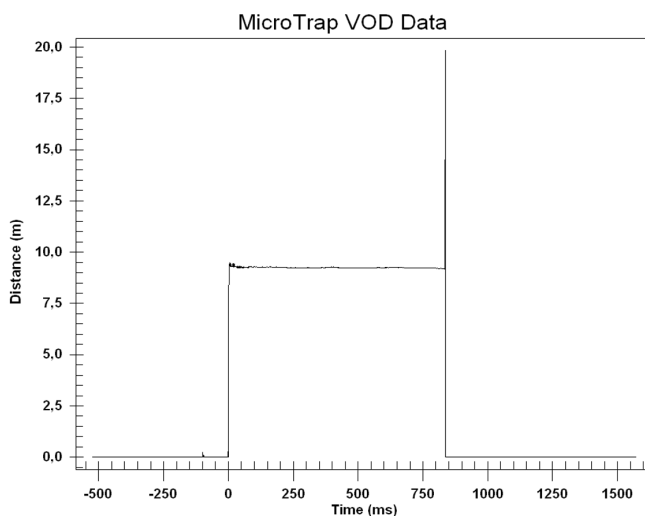
Rozpoczęciem cyklu pomiaru rzeczywistej prędkości detonacji MW, jest umieszczenie przewodu sondy w ładunku MW, znajdującym się na przykład w otworze strzałowym. Przed umieszczeniem w ładunku MW skręca się (zwiera) przewód sondy z ekranem. Powstałe połączenie przymocowuje się do naboju udarowego, poprzez owinięcie sondy wraz z nabojem udarowym taśmą izolacyjną, i opuszczenie na dno otworu. Następnie do otworu ładowany jest materiał wybuchowy. Sondę można wprowadzać do jednego otworu, lub szeregu otworów. W tym drugim przypadku musi być zachowana ciągłość połączenia poszczególnych sond. Po załadowaniu otworu (otworów) końcówki sondy (przewód zielony) i kabla koncentrycznego RG-85 zostają połączone (ekran z ekranem, przewód z przewodem) i podłączone do aparatury. Po sprawdzeniu prawidłowości połączenia umieszcza się aparaturę w bezpiecznym miejscu i włącza w stan czuwania [3].

3.1. Przykładowa analiza wyników

Aby prawidłowo dokonać interpretacji wyników, należy zebrać jak najwięcej informacji na temat rodzaju MW jakim został załadowany otwór (otwory) strzałowy.

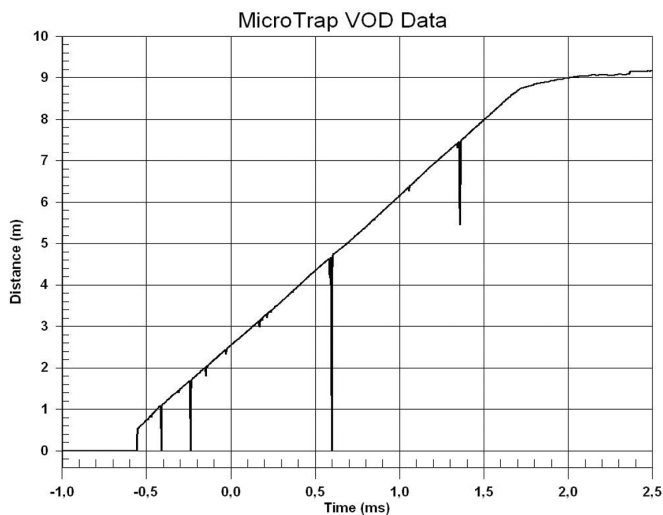
W podanym przykładzie, w pierwszej fazie na dno otworu odchylonego od pionu o kąt $\alpha = 200$, o średnicy 100 mm i długości 11,2 m, jako pobudzacze zostały wprowadzone dwa naboje MWE (masa 2,5 kg, średnica 65 mm, gęstość 1,1–1,15 g/cm³), do których przymocowano zwarty koniec sondy. Następnie otwory zostały wypełnione MW typu ANFO, a w części przywylotowej — przybitką.

Po odpaleniu serii, dane dotyczące prędkości detonacji zostały zapisane przez aparaturę, dalej przekazane do komputera i poddane analizie. Wyniki pomiarów przedstawia rysunek 6.



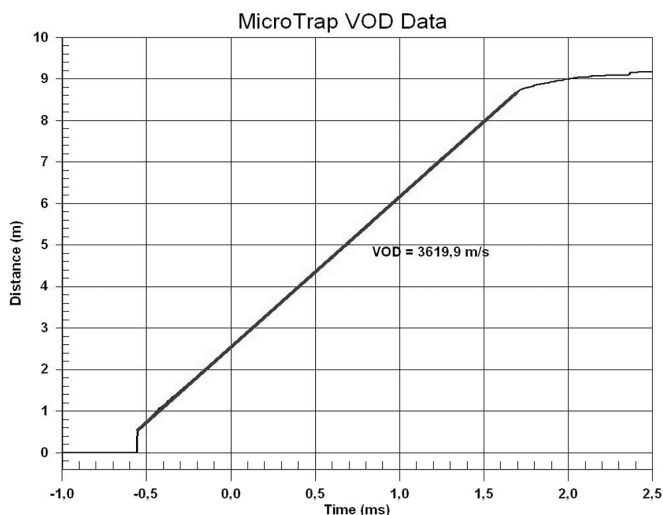
Rys. 6. Wykres prędkości detonacji ANFO zarejestrowany przez MicroTrap

Pozioma linia na wykresie (rys. 6) sygnalizuje zakończenie fazy pomiarowej. Dla bardziej szczegółowego przeanalizowania zjawiska powiększono obraz wykresu, co przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Wykres prędkości detonacji ANFO zarejestrowany przez MicroTrap po powiększeniu

Na wykresie (rys. 7) widoczne są zakłócenia powstałe podczas przebiegu detonacji, które zostały skorygowane (rys. 8).



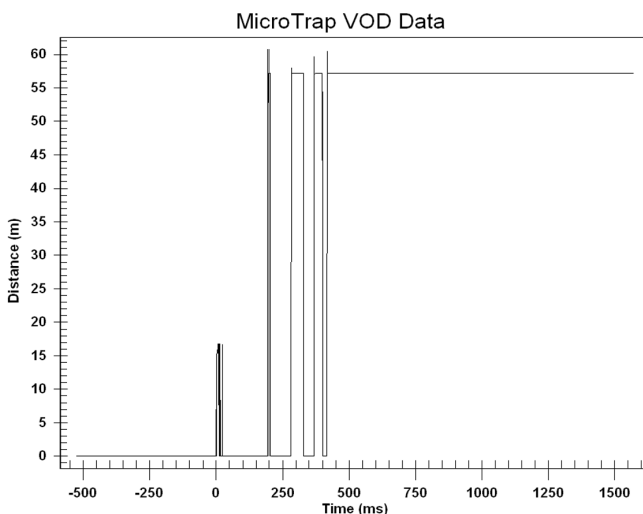
Rys. 8. Wykres prędkości detonacji ANFO po analizie

W dolnej części wykresu pionowa linia prosta charakteryzuje moment wybuchu ładunku udarowego, dalej linia nachylona ilustruje detonację MW zasadniczego. Z zarejestrowanego czasu trwania zjawiska i odległości (drogi), obliczana jest rzeczywista prędkość detonacji. Dla omawianego przypadku, a więc MW typu ANFO, rzeczywista prędkość detonacji wyniosła $D = 3619,9$ m/s (rys. 8).

3.2. Inny przykład zastosowania aparatury do pomiaru prędkości detonacji MWE

Na dno otworu strzałowego odchylonego od pionu o kąt $\alpha = 250$ o długości 18,5 m i średnicy 89 mm wprowadzono ładunek udarowy o masie 1250 g i średnicy 50 mm, a następnie otwór wypełniono MWE w ilości 110,0 kg. Gęstość ładowanego MW wynosiła $\rho_{MW} = 1,05\text{--}1,18$ g/cm³. Partię górną ładunku MWE uzupełniono drugim ładunkiem udarowym (takim samym jak na dnie otworu), a następnie wykonano przybitkę na odcinku 2,5 m.

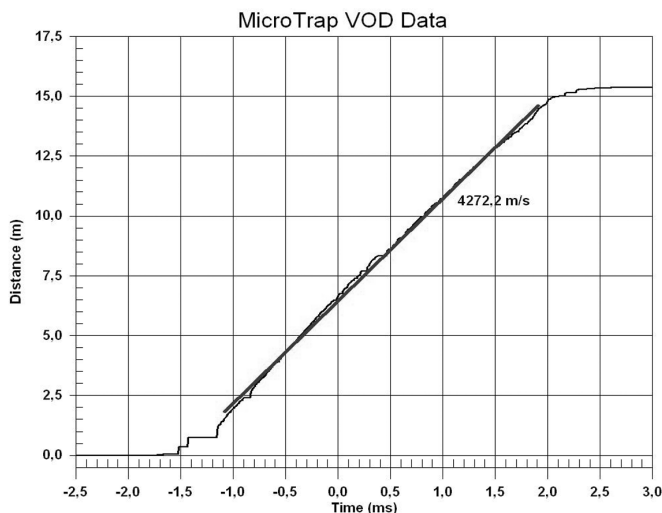
Po odpaleniu, dane dotyczące prędkości detonacji zostały zapisane przez aparaturę, które później przekazano do komputera.



Rys. 9. Wykres prędkości detonacji MWE zarejestrowany przez MicroTrap

Na rysunku 9 przedstawiony jest oryginalny wykres zarejestrowany przez MicroTrap. Po powiększeniu obrazu i dokonaniu jego korekty, co ilustruje rysunek 10, wyniki poddano analizie.

W dolnej części widoczne są skoki spowodowane detonacją ładunku udarowego, w dalszej części widać czysty obraz przebiegającej detonacji, prędkość jest stabilna i nie ma większych skoków na wykresie, co świadczy o ciągłości ładunku MW w otworze strzałowym. Dla omawianego przypadku, a więc MW typu MWE rzeczywista prędkość detonacji wyniosła $D = 4272,2$ m/s (rys. 10).



Rys. 10. Wykres prędkości detonacji MWE po analizie

4. Podsumowanie

Na podstawie przeanalizowanego zapisu prędkości detonacji MW w otworze można wyciągnąć wiele informacji na temat przebiegu procesu, np. czy nastąpił on prawidłowo.

W podanych przykładach widać bardzo czyste przebiegi detonacji, bez żadnych zakłóceń, a więc można stwierdzić, że nie było np. żadnej ucieczki MW do szczelin skalnych. Rejestracja procesu rozpoczęła się w dolnej części otworu (od naboju udarowego dolnego) i postępowała ku górze do jej zakończenia. Powyższe potwierdzają przydatność aparatury Micro-Trap do stosowania w warunkach przemysłowych.

Wyniki pomiarów rzeczywistej prędkości detonacji mogą być podstawą do analiz, wiążących różnorodne efekty przemysłowych strzelań technologicznych, z bardzo ważnym parametrem charakteryzującym stosowany MW. Badania takie mają wielką wartość poznawczą i powinny pozwolić na znaczną racjonalizację doboru MW dla wykonywania strzelań.

LITERATURA

- [1] *Batko P.*: Wpływ właściwości strzelniczych materiału wybuchowego na efekt sejsmiczny strzelania. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Studia rozprawy monografie 105, Kraków 2002
- [2] *Korzeniowski J.I., Onderka Z.*: Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym. Wrocław 2006
- [3] *MicroTrap VOD/Data Recorder*. VOD operations manual. Manufactured by MREL specialty explosive products limited — instrukcja obsługi
- [4] *Onderka Z.*: Praktyczne aspekty detonacji materiałów wybuchowych. Konferencja „Technika strzelnicza w górnictwie” Jaszowiec 2001
- [5] *Onderka Z.*: Technika strzelnicza w górnictwie odkrywkowym cz.1. Fizyka detonacji materiałów wybuchowych. Skrypty Uczelniane AGH Nr 1009, Kraków 1986

- [6] *Smoleński D.*: Detonacja materiałów wybuchowych. Wydawnictwo MON, Warszawa 1981
- [7] *Włodarczyk E.*: Wstęp do mechaniki wybuchu. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994
- [8] *Wujek R.*: Wpływ stosowania mechanicznie ładowanych MW emulsyjnych luzem o regulowanych właściwościach na końcowy efekt robót strzałowych. Praca magisterska AGH, Kraków 2007