

Wpływ przestrzennego położenia zapalnika w ładunku materiału wybuchowego emulsyjnego luzem na skuteczność detonacji

Impact of spatial position of detonator in bulk emulsion explosive charge on detonation efficiency



*Dr inż. Piotr Mertuszka**



*Mgr inż. Krzysztof Fulawka**



*Mgr inż. Marcin Szumny**



*Mgr inż. Adam Zdrojewski***

Treść: Materiały wybuchowe emulsyjne należą do grupy materiałów stosunkowo bezpiecznych, co związane jest z ich niewielką wrażliwością na działanie czynników zewnętrznych. Aby zapewnić optymalne warunki inicjacji ładunków MW, konieczne jest doprowadzenie odpowiednio silnego impulsu energetycznego. W celu zwiększenia energii początkowej wybuchu, ładunki inicjuje się przy pomocy zapalnika i pobudzacza. Jednak w przypadku urabiania skał miękkich, takich jak piaskowce, materiał wybuchowy inicjowany jest najczęściej przy użyciu zapalników. Biorąc pod uwagę wymiary zapalników, prawdopodobnym jest, że w trakcie łączenia obwodu strzałowego może dochodzić do zmiany ich lokalizacji w otworze strzałowym. Taka sytuacja może negatywnie wpływać na efekt końcowy robót strzałowych. W ramach niniejszego opracowania przeanalizowano wpływ przestrzennego położenia zapalnika w ładunku MWE luzem na skuteczność detonacji.

Abstract: Emulsion explosives belong to a group of relatively safe materials. It is related to their low sensitivity to external impulses. To ensure optimum conditions for initiating process, a sufficiently strong energy impulse must be applied. In order to increase the initial energy of the explosion, charges are initiated by means of a detonator and booster. However, in case of detonation in soft rocks such as sandstones, the explosive is most often initiated using detonators only. In the light of the dimensions of the detonators, it is likely that detonators may change their location in the blast hole during the loading process. It may adversely affect the final effect of blasting works. The aim of this paper is to analyse the effect of the position of the igniter within the bulk emulsion explosive charge on the detonation efficiency.

Słowa kluczowe:

technika strzałowa, materiały wybuchowe, prędkość detonacji

Keywords:

blasting technique, explosives, detonation velocity

*KGHM CUPRUM Sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

** KGHM Polska Miedź S.A. Oddział Zakłady Górnicze „Lubin”, Lubin

1. Wprowadzenie

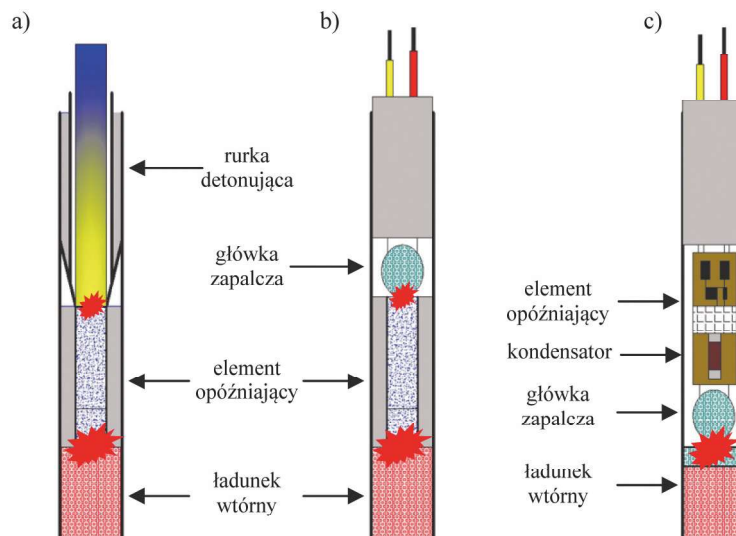
Materiały wybuchowe (MW) stosowane w przemyśle wydobywczym, ze względów bezpieczeństwa, powinny się charakteryzować niską wrażliwością na bodźce zewnętrzne. Warunek ten spełniają materiały wybuchowe emulsyjne (Maranda i in. 2008). Warunkiem koniecznym rozpoczęcia procesu detonacji MW jest dostarczenie impulsu inicjującego o odpowiednio dużej energii, w wyniku którego dochodzi do zainicjowania cząstek materiału wybuchowego. Jeżeli ilość dostarczonej energii jest wystarczająco duża, reakcja ulega gwałtownemu przyspieszeniu, które z kolei prowadzi do zjawiska detonacji. W przeciwnym razie proces ten kończy się wygaszeniem detonacji bądź deflagacją MW, co jest sytuacją skrajnie niepożądaną (Morawa, Onderka 2013).

Na zdolność do detonacji materiałów wybuchowych emulsyjnych, w szczególności MWE luzem, wpływa wiele czynników. Zmiana średnicy ładunku, rodzaju i zawartości uczulacza, gęstości ładunku czy ciśnienia, przy jakim dany MW jest stosowany, mogą w znacznym stopniu obniżyć bądź zwiększać wrażliwość na impuls wybuchowy (Zygmunt i in. 2007). Istotny wpływ na zdolność materiału wybuchowego emulsyjnego do detonacji mają również czynniki zewnętrzne, które związane są z technologią i warunkami prowadzenia robót strzałowych. Spośród szeregu czynników wymienić należy temperaturę skał, zawodnienie otworów strzałowych czy czas przebywania MW w otworze. Do inicjacji ładunków MW w kopalniach podziemnych prowadzących eksploatację złóż skał twardych stosuje się różnego typu zapalniki (elektryczne, nieelektryczne lub elektroniczne) oraz – w razie potrzeby – różnego rodzaju pobudzacze, których zadaniem jest zapewnienie odpowiedniego impulsu energetycznego. Doboru właściwego sposobu inicjacji dokonuje się w oparciu o właściwości stosowanego materiału wybuchowego, parametry siatki strzałowej (m.in. średnicy otworu strzałowego) oraz właściwości mechaniczne skał. Pomijana jest jednak kwestia przestrzennego położenia zapalnika/pobudzacza w ładunku MW. Mając na uwadze, że ładunek wtórny w zapalniku ma długość około 2 cm i zlokalizowany jest na dnie łuski zapalnika (rys. 1), można przypuszczać, że jego przechylenie bądź wyciągnięcie z dna otworu (np. w trakcie łączenia

obwodu strzałowego w przodku), może mieć istotny wpływ na efektywność robót strzałowych w wyniku niewłaściwego rozproszenia energii impulsu inicjującego. Taka sytuacja doprowadzić może do wydłużenia czasu uzyskania przez materiał wybuchowy poziomu stabilnej wartości prędkości detonacji, powstawaniem tzw. „fajek”, a w szczególnych przypadkach także pojawianiem się niewybuchu.

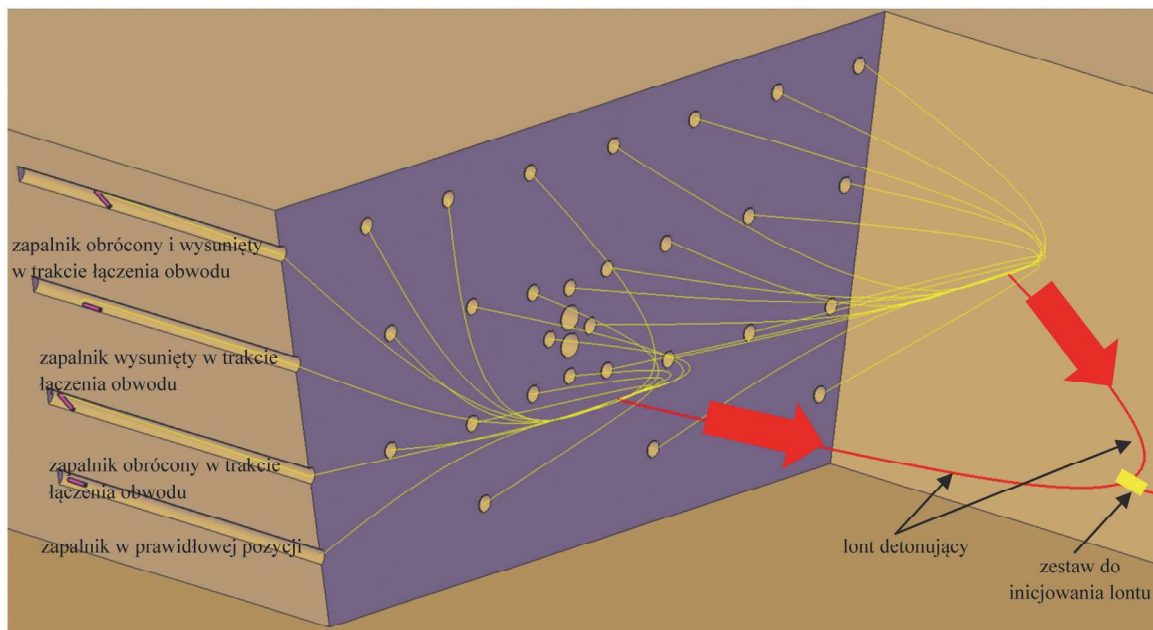
W przypadku stosowania nieelektrycznego systemu inicjacji, przed podłączeniem zapalników do linii strzałowej, górnik strzałowy łączy rurki detonujące w tzw. miotłki, które następnie łączy ze sobą przy pomocy lontu detonującego. W trakcie łączenia rurek detonujących, szczególnie z otworów położonych przy ociosach przodka, są one naciągane, przez co może dojść do obrócenia, bądź częściowego wysunięcia zapalnika z dna otworu strzałowego. W rezultacie energia wybuchu zapalnika może zostać niewłaściwie ukierunkowana, a w odstrzelonym przodku mogą pojawić się tzw. „fajki” i resztki niezdetonowanego MW. Na rys. 2 przedstawiono wybrane położenia zapalnika, do których może dojść w trakcie łączenia obwodu strzałowego.

Jak zaznaczają Lopez Jimeno i in. (1995), aby zmaksymalizować efekt początkowego impulsu energetycznego, zapalnik powinien być umieszczony w osi ładunku MW. W przeciwnym wypadku, część energii może zostać rozproszona, zaś efekt wykonanych robót strzałowych może w istotnym stopniu odbiegać od oczekiwanego. Należy jednak zaznaczyć, że ww. autorzy opierali się wyłącznie na rozważaniach teoretycznych i nie potwierdzili postawionej tezy wynikami badań. Kolejne opracowanie w zakresie badań sposobu inicjacji ładunków MW przedstawili Gupta i in. (2001), którzy w ramach działalności Indyjskiego Narodowego Instytutu Mechaniki Górnotworu przeprowadzili badania dotyczące wpływu lokalizacji środków inicjujących na prędkość detonacji materiału wybuchowego. Badania te jednak nie odnosiły się ściśle do przestrzennej lokalizacji zapalnika względem osi ładunku MW, lecz opisywały zależność pomiędzy prędkością detonacji materiału wybuchowego a lokalizacją zapalników i pobudzaczy w wielopunktowym systemie inicjacji. Niemniej w wyniku badań wykazano, że położenie pobudzaczy nie wpływa istotnie na prędkość detonacji MW, jednak z uwagi na trudności urabiania ośrodka skalnego na dnie otworu, za-



Rys. 1. Schematy zapalników stosowanych do inicjowania ładunków MW (Sobala, 2006) a) nieelektryczny, b) elektryczny, c) elektroniczny

Fig. 1. Schemes of detonators used for initiation of explosive charges (Sobala, 2006) a) non-electric detonator b) electric detonator c) electronic detonator



Rys. 2. Schemat przodka z wybranymi położeniami zapalnika w otworach strzałowych
Fig. 2. The diagram of the mining face with selected locations of the detonator within the blast holes

pewnienie odpowiedniej energii inicjującej w tym obszarze wpływa korzystnie na efekt końcowy robót strzałowych.

Analizę propagacji energii wybuchu w zależności od lokalizacji zapalnika przedstawił również Bahadori i in. (2017). W ramach badań przeprowadzono porównanie odpalania ładunków MW umieszczonych w otworach strzałowych w zależności od miejsca inicjacji, tj. tylnej oraz przedniej. Badania uzupełniono o rozwiązania numeryczne. Ostatecznie autorzy stwierdzili, że lokalizacja zapalnika ma istotny wpływ na efekt robót strzałowych, gdyż determinuje kierunek generowania energii detonacji dla całej kolumny MW.

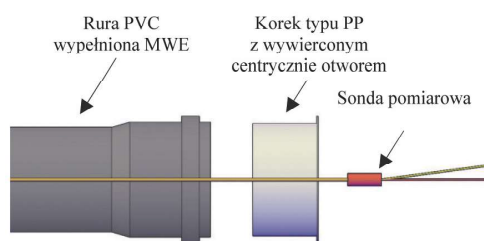
W dostępnej literaturze nie spotkano jednak opracowania dotyczącego wpływu lokalizacji przestrzennej zapalnika względem osi ładunku materiału wybuchowego na skuteczność detonacji. Zagadnienie to wydaje się być szczególnie istotne w sytuacji, kiedy do inicjacji ładunków MWE luzem nie stosuje się pobudzaczy, ale wyłącznie zapalniki. W związku z powyższym przeprowadzono serię badań mających na celu określenie wpływu przestrzennego położenia zapalnika w ładunku MWE luzem na przebieg detonacji.

2. Metodyka i przedmiot badań

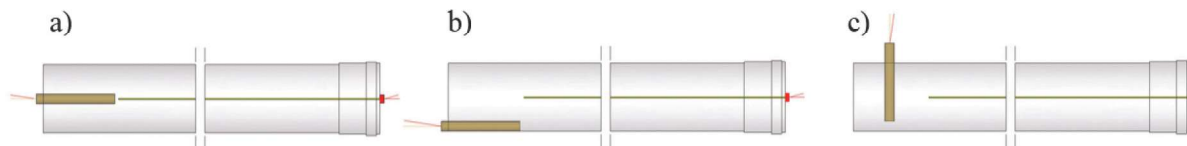
Badania przeprowadzono w wybranych wyrobiskach podziemnych Zakładów Górniczych „Lubin”. Analizowanym

kryterium była charakterystyka przebiegu prędkości detonacji na całej długości ładunku materiału wybuchowego, ze szczególnym uwzględnieniem etapu „rozbiegu” MW. Do badań wykorzystano aparaturę pomiarową MicroTrap™ kanadyjskiej firmy MREL. Urządzenie to umożliwia prowadzenie ciągłej rejestracji prędkości detonacji ładunków MW w oparciu o metodę elektryczną. Szczegółowy opis zasady działania urządzenia MicroTrap™ znaleźć można w literaturze przedmiotu (Mertuszka i in. 2017). Istotną zaletą wykorzystanego do badań systemu pomiarowego jest możliwość rejestracji prędkości detonacji z częstotliwością 2 MHz. Rejestracja co 0,5 μ s umożliwia wykreślenie z bardzo dużą dokładnością przebiegu procesu detonacji MW na całej długości ładunku.

Do badań przygotowano 9 ładunków wykonanych z rur PVC o średnicy wewnętrznej 50 mm i długości 100 cm wypełnionych materiałem wybuchowym emulsyjnym luzem o nazwie handlowej Emulinit 8L, którego producentem jest firma NITROERG S.A. Rury ładowano z modułowego urządzenia pompującego umieszczonego na Samojezdnym Wozie Strzałowym. Do każdej z rur wprowadzono około 2,2 kg materiału wybuchowego. Taka ilość gwarantowała ich 100-procentowe wypełnienie po nagazowaniu. W momencie ustabilizowania się gęstości ładunków na poziomie 1,1 g/cm^3 , rury zaślepiono z obydwu stron. Następnie do tak przygotowanych ładunków wprowadzono sondy pomiarowe w postaci rurek koncentrycznych (rys. 3).



Rys. 3. Sposób montażu sondy pomiarowej w ładunku MW (z lewej) oraz jego widok (z prawej)
Fig. 3. Scheme of installation of the ProbeRod in explosive sample (left) and the sample prior to firing (right)



Rys. 4. Schematy montażu zapalników dla poszczególnych serii badań: a) zapalnik umieszczony centralnie w osi ładunku, b) na ścianie ładunku, c) prostopadłe do osi ładunku

Fig. 4. Schemes of detonators installation applied for selected series of tests: a) detonator located along the axis of sample, b) on the side wall of sample, c) perpendicular to the axis of sample

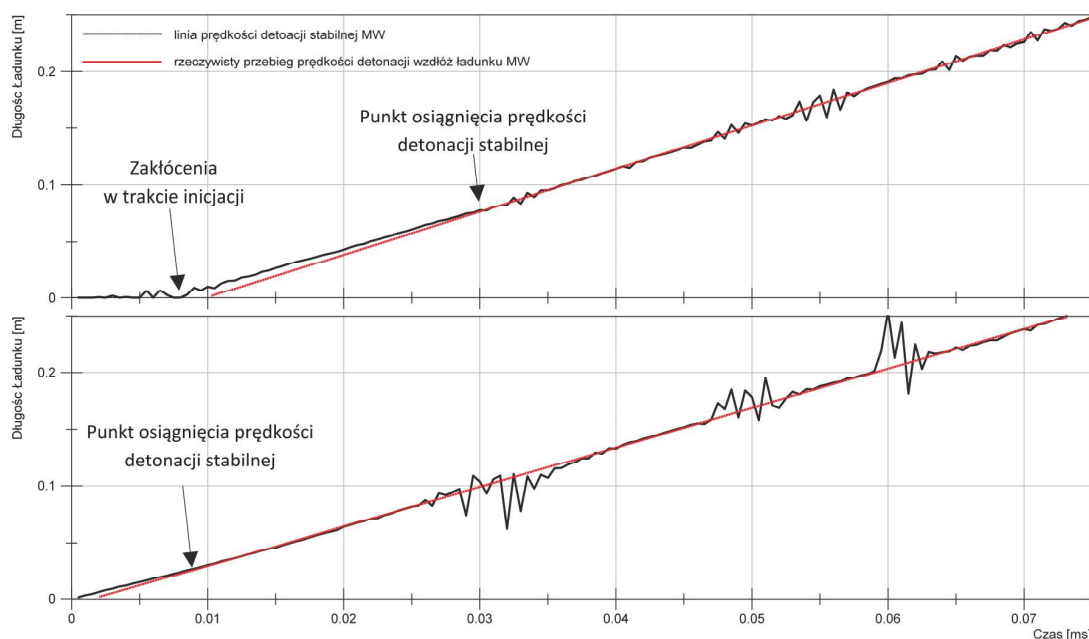


Rys. 5. Widok próby przygotowanej do odpalenia dla wariantu a (z lewej) i c (z prawej)
Fig. 5. View of sample prior to firing for variant a (left) and c (right)

Do inicjacji ładunków zastosowano zapalniki elektryczne skalne natychmiastowe NITRODET 0,20 A. Przeprowadzono łącznie trzy serie badań, które różniły się przestrzennym położeniem zapalnika: centralnie w osi ładunku, na ścianie próby oraz prostopadłe do ładunku (rys. 4, 5). Ostatni wariant jest przypadkiem skrajnym. Do podobnej sytuacji może dojść jedynie w przypadku odpalania otworów o średnicy 64 mm lub większych. W celu uśrednienia wyników pomiarów, w ramach każdej serii badań odpalono po trzy ładunki.

Ładunki odpalano umieszczając je w otworach strzało-

wych, po ustabilizowaniu się gęstości materiału wybuchowego, aby zminimalizować niekorzystny wpływ czasu na zachowanie się MW. Efektywność pierwszego etapu procesu detonacji ładunku MW można ocenić w oparciu o charakterystyki czasowo-odległościowe. Na rys. 6 przedstawiono przykładowe przebiegi prędkości detonacji na odcinku pierwszych 25 cm od miejsca pobudzenia z odniesieniem do przebiegu optymalnej detonacji (rys. 6). Im szybciej rzeczywisty przebieg prędkości detonacji pokryje się z aproksymowaną linią prędkości detonacji stabilnej, tym lepszy jest efekt inicjacji.



Rys. 6. Przykładowy przebieg prędkości detonacji w przypadku inicjacji zapalnikiem zlokalizowanym prostopadłe do osi ładunku (góra) oraz zapalnikiem umieszczonym w osi ładunku MW (dół)

Fig. 6. VOD graph for initiation with the detonator located perpendicular to the sample axis (top) and the detonator placed along the charge axis (bottom)

Jak widać, w przypadku inicjacji zapalnikiem zlokalizowanym prostopadle do ładunku, prędkość detonacji MWE osiągnęła poziom maksymalny dopiero po odcinku 7,5 cm. Co więcej, w początkowym etapie detonacji zarejestrowano pewne zakłócenia, co może wynikać z niewłaściwego ukierunkowania energii. W przypadku inicjacji osiowej, proces detonacji przebiega bez zakłóceń praktycznie od samego początku, zaś materiał osiąga swoją maksymalną prędkość detonacji już po około 5 cm.

Zarejestrowane zmiany oporności sondy pomiarowej w czasie umożliwiają wygenerowanie charakterystyk czasowo-odległościowych (rys. 7). Na ich podstawie, przy pomocy dołączonego do aparatury pakietu oprogramowania, można wyznaczyć średnią prędkość detonacji na odcinku całego ładunku MW. Prędkość detonacji można obliczyć z zastosowaniem metod regresji liniowej bądź analizy dwupunktowej.

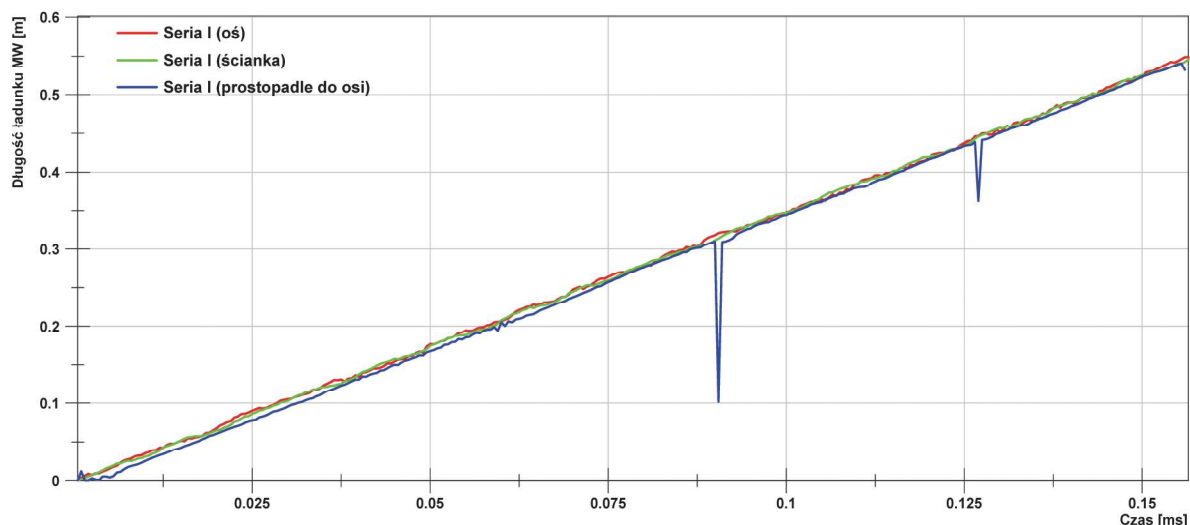
Z uwagi na dużą dynamikę rozwoju procesu detonacji, badanie wpływu przestrzennego położenia zapalnika na skuteczność inicjacji jest zagadnieniem dość skomplikowanym. Obliczenie wartości średniej wydaje się być zbyt dużym uogólnieniem, które uniemożliwia prawidłową ocenę przebiegu detonacji. Co więcej, graficzne przedstawienie charakterystyk czasowo-odległościowych dla przebiegów o zbliżonych przebiegach, nie może być podstawą do szybkiej i wiarygodnej oceny rozwoju detonacji w jej początkowym etapie. Na rys. 7 przedstawiono przebiegi prędkości detonacji dla prób odpalonych w ramach pierwszej serii badań. Prędkości dla poszczególnych lokalizacji zapalnika praktycznie się ze sobą pokrywają. Różnice pojawiają się jednak na odcinku pierwszych kilku centymetrów od miejsca pobudzenia. Dla właściwej oceny skuteczności inicjacji w zależności od położenia zapalnika, należałoby skupić się wyłącznie na początkowych odcinkach przebiegów.

Bardziej odpowiednim z punktu widzenia dokładności analizy wydaje się być podejście bazujące na obliczeniach prędkości chwilowej w oparciu o poniższy wzór:

$$v_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1000 \cdot \Delta s}{\Delta t} \quad [\text{km/s}] \quad (1)$$

gdzie:

- v_i – wartość chwilowa prędkości detonacji w i -tym punkcie [m/s],
- Δs – przyrost odległości między punktem i oraz $i-1$ [m],
- Δt – przyrost czasu między punktem i oraz $i-1$ [s].



Rys. 7. Porównanie charakterystyk czasowo-odległościowych dla ładunków MWE odpalonych w ramach pierwszej serii badań

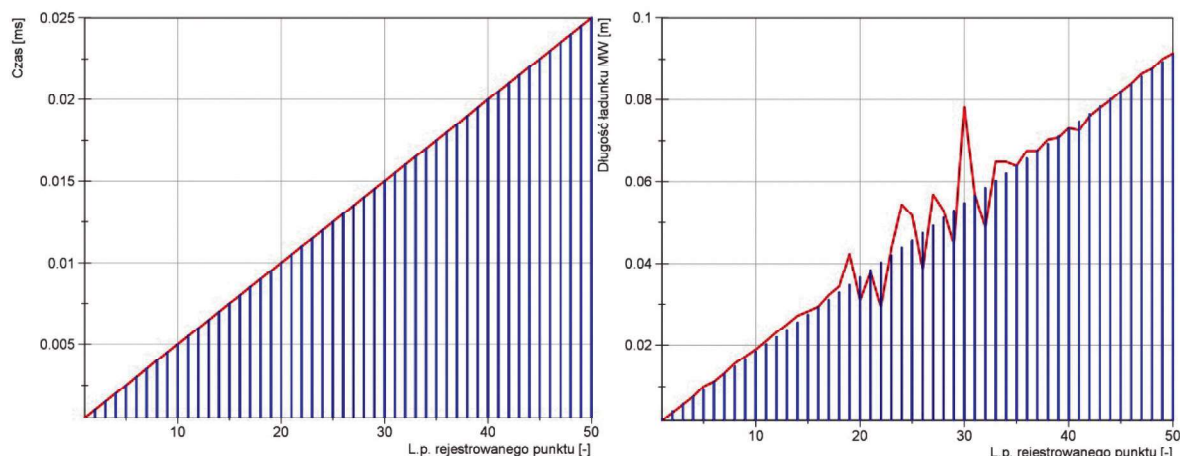
Fig. 7. Comparison of time-distance characteristics for samples fired within first series of tests

Obliczoną prędkość detonacji można skorelować ponownie z zarejestrowanym czasem, co jest podstawą do wygenerowania wykresów zależności prędkości detonacji od czasu. Inaczej mówiąc, możliwe jest wygenerowanie charakterystyk rozwoju detonacji do momentu osiągnięcia prędkości detonacji stabilnej. W przypadku braku zakłóceń na zarejestrowanych przebiegach, możliwe jest również odniesienie prędkości detonacji do poszczególnych odcinków ładunku MW, co umożliwiłoby proste określenie długości „rozbiegu” materiału do wartości detonacji stabilnej. Należy jednak zaznaczyć, że korelacja prędkość-odległość (Yao i in. 2013) jest obciążona pewnym błędem wynikającym z braku liniowości zarejestrowanej krzywej reprezentującej odległość. Przebieg procesu inicjacji wiąże się z dużą zmiennością prędkości w czasie, co wynika między innymi z „rozpędzania” MW, bądź z zakłóceń spowodowanych np. przewodnością elektryczną materiałów wybuchowych emulsyjnych. Porównanie przebiegów krzywej czasowej oraz krzywej odległościowej przedstawia rys. 8.

Istnieje możliwość wygenerowania krzywej bazowej reprezentującej odległość, choćby poprzez wygładzenie przebiegu filtrem Savitzky’ego i Golaya, jednak każde uśrednienie wartości generuje pewien błąd, co w związku z dużą dokładnością obliczeń (krok czasowy 0,5 μ s) jest podejściem niedopuszczalnym. Na potrzeby niniejszej analizy bazowano więc na charakterystykach prędkość detonacji – czas.

3. Analiza wyników badań

Na podstawie wyników obliczeń chwilowych wartości prędkości detonacji dla pierwszej serii pomiarowej stwierdzono, że najlepszą inicjację ładunków MW zapewnia zapalnik zlokalizowany w osi ładunku, dla którego krzywa reprezentująca wartości chwilowe prędkości detonacji przyjmuje charakterystykę najbardziej zbliżoną do linii poziomej (rys. 9). Oznacza to, że inicjacja zapewniła takie rozproszenie energii zapalnika, że badany materiał wybuchowy niemalże od razu osiągnął prędkość docelową, tj. prędkość detonacji stabilnej. Nieco gorszy efekt uzyskano w przypadku inicjacji zapalnikiem położonym na wewnętrznej ściance próby. Materiał wybuchowy inicjowany w ten sposób osiąga prędkość detonacji stabilnej po czasie dłuższym, niż w przypadku inicjacji osiowej. Najgorszą skuteczność inicjacji zaobserwowano



Rys. 8. Przykładowe przebiegi krzywej czasowej (z lewej) i krzywej odległościowej (z prawej)

Fig. 8. Example of time-dependent curve (left) and distance-dependent (right)

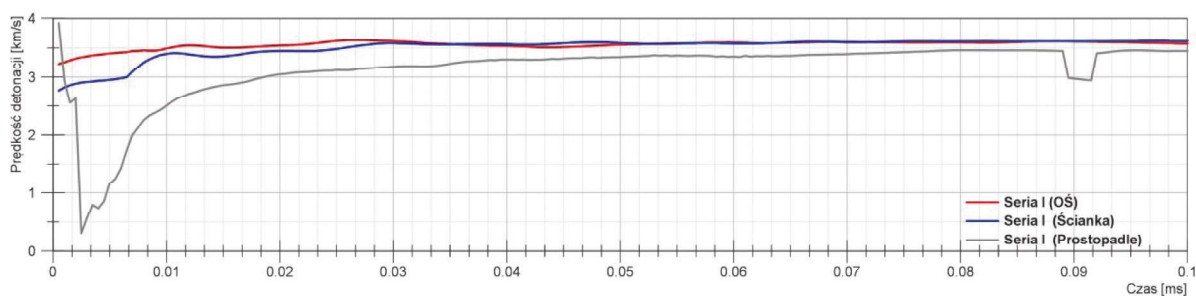
w przypadku zapalnika zlokalizowanego prostopadłe do osi ładunku. Przy takim położeniu zapalnika, impuls energetyczny nie zapewnia od początku wznoszącej charakterystyki prędkości detonacji, co jest najprawdopodobniej związane z częściowym rozproszeniem źle ukierunkowanej energii.

W drugiej serii pomiarowej zdetonowały jedynie ładunki MW zainicjowane zapalnikiem położonym w osi ładunku oraz zapalnikiem położonym na wewnętrznej ściance próby (rys. 10). Obydwa zarejestrowane przebiegi prędkości detonacji charakteryzują się stosunkowo płaską charakterystyką, co wskazuje na poprawne rozproszenie energii impulsu inicjującego. Należy jednak zaznaczyć, że inicjacja przy pomocy zapalnika zlokalizowanego w osi ładunku daje minimalnie lepszy efekt, na co wskazuje wyższa początkowa wartość prędkości detonacji.

Ładunek uzbrojony zapalnikiem zlokalizowanym prostopadłe do osi próby nie zdetonował, pomimo właściwej

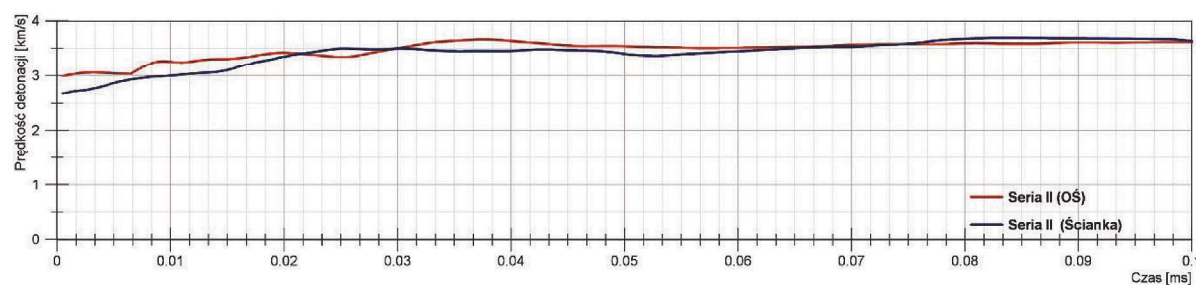
detonacji samego zapalnika. Jak widać na rys. 11, energia impulsu inicjującego z zapalnika nie została przeniesiona na dalszą część ładunku, przez co doszło do wygaszenia detonacji.

Wyniki obliczeń chwilowej prędkości detonacji dla ostatniej serii pomiarowej wskazują, że podobnie jak w serii I, najbardziej skuteczną inicjację zapewnił zapalnik zlokalizowany w osi ładunku, dla którego krzywa reprezentująca wartości chwilowe prędkości detonacji przyjmuje charakter zbliżony do linii poziomej. Zdecydowanie gorszą charakterystykę inicjacji reprezentuje krzywa prędkości detonacji chwilowej ładunku MW inicjowanego zapalnikiem położonym na wewnętrznej ściance próby. Najslabsze wyniki z punktu widzenia efektywności przenoszenia detonacji z zapalnika na materiał wybuchowy, podobnie jak w pozostałych dwóch seriach pomiarowych, zaobserwowano dla ładunku inicjowanego zapalnikiem umieszczonym prostopadłe do osi próby (rys. 12).



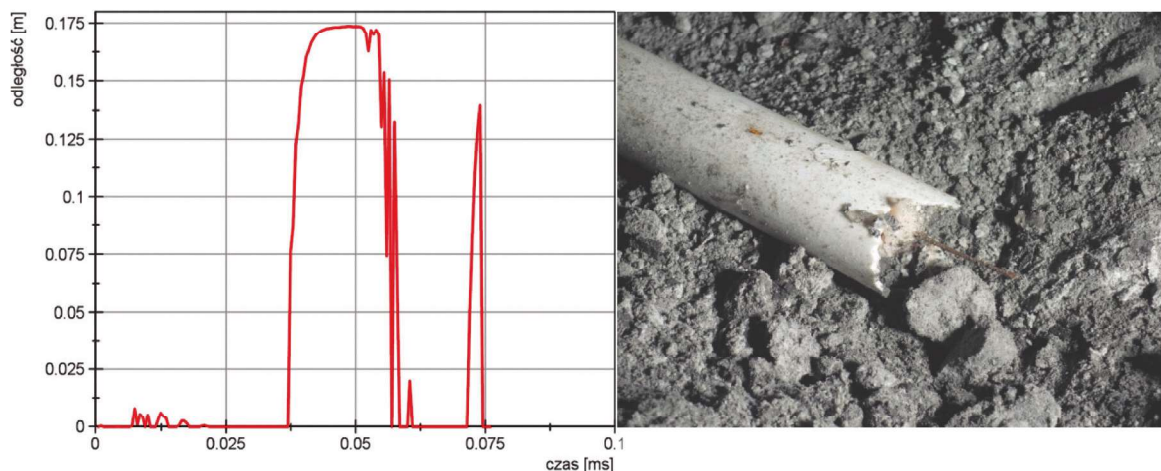
Rys. 9. Porównanie przebiegów rozwoju prędkości detonacji w czasie przy różnych położeniach zapalnika (Seria I)

Fig. 9. Comparison of the VOD development in time with respect to various positions of the detonator (Series I)



Rys. 10. Porównanie przebiegów rozwoju prędkości detonacji w czasie przy różnych położeniach zapalnika (Seria II)

Fig. 10. Comparison of the VOD development in time with respect to various positions of the detonator (Series II)



Rys. 11. Charakterystyka czasowo-odległościowa ładunku MWE inicjowanego zapalnikiem położonym prostopadle do osi próby (z lewej) oraz widok próby po odpaleniu (z prawej)

Fig. 11. Time-distance characteristics of bulk emulsion explosive initiated with the detonator located perpendicularly to the sample axis (left) and the view of the sample after firing (Wright)

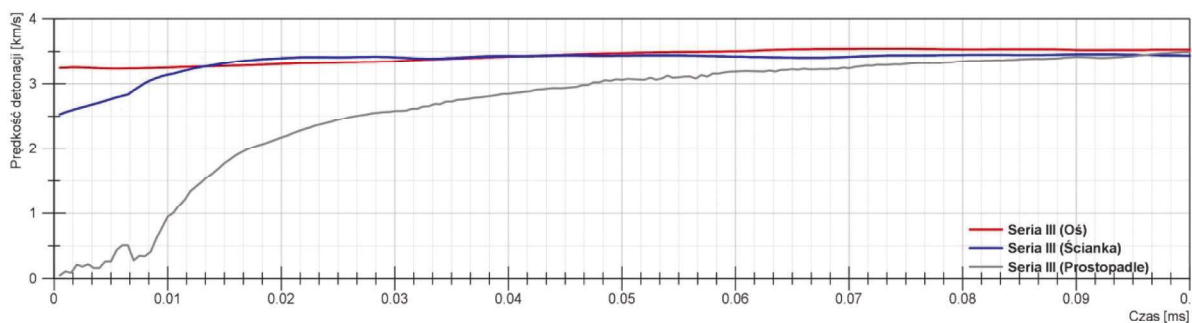
Przedstawione wyniki badań pozwoliły na uzyskanie bardziej szczegółowych informacji w zakresie wpływu przestrzennego położenia zapalnika na charakterystykę „rozbiegu” detonacji. Na podstawie początkowego odcinka krzywej możliwe było prześledzenie etapu przenoszenia detonacji z zapalnika na materiał wybuchowy. Początkowe odcinki przebiegów detonacji przedstawione na rys. 9, 10 i 12 dla ułożenia zapalnika w osi i na ścianie rury są do siebie zbliżone. Różnica widoczna jest jedynie dla ułożenia prostopadłego (rys. 9, 12), co wskazuje na niewłaściwe rozproszenie energii impulsu inicjującego i problem z przeniesieniem detonacji z zapalnika na materiał wybuchowy. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, niewłaściwe położenie zapalnika może znacząco wydłużyć etap „rozbiegu” MW, a w skrajnych przypadkach nawet zatrzymać proces detonacji. Nie przeanalizowano jednak zagadnienia skuteczności detonacji w przypadku wyciągania zapalników z otworów strzałowych w trakcie ich łączenia w aspekcie pojawiania się tzw. „fajek”. Problem ten nie dotyczy, przynajmniej w takim zakresie, materiałów wybuchowych nabojujących, gdzie zapalnik wprowadza się bezpośrednio do ładunku, który umieszczany jest na dnie otworu strzałowego. Niemniej powinien zostać także szczegółowo przeanalizowany.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i obliczeń stwierdzono, że przestrzenne położenie zapalnika w otworze

strzałowym ma znaczący wpływ na rozwój detonacji. We wszystkich wykonanych seriach pomiarowych, najlepszy efekt inicjacji zaobserwowano w przypadku zapalnika umieszczonego centralnie w osi próbki. Krzywe chwilowe prędkości detonacji są zbliżone do linii poziomej, co wskazuje na wysoką efektywność procesu inicjacji. Nieco gorszy, aczkolwiek w dalszym ciągu zadowalający efekt uzyskano przy inicjacji ładunków zapalnikiem umieszczonym na ścianie wewnętrznej próby. Jak wynika z obliczeń, w przypadku takiego położenia zapalnika, energia impulsu początkowego nie zapewnia optymalnego czasu rozpędzenia MWE luzem do prędkości detonacji stabilnej, co może negatywnie wpływać na proces urabiania skał w obrębie dna otworu strzałowego lub doprowadzić do pozostawiania resztek niezdetonowanego materiału wybuchowego na dnie otworu. Nieodstrzelone otwory o głębokości od kilku do kilkudziesięciu centymetrów, oprócz strat wynikających z urabiania na niepełnej długości zabioru, często zaburzają cykl technologiczny, gdyż według przepisów, nie wolno pracować w niebezpiecznym zasięgu niewypału, dopóki ładunek nie zostanie unieszkodliwiony. Proces ten jest szczególnie niepożądany w przypadku otworów stosunkowo krótkich, tj. 3÷4 m. W takich przypadkach straty mogą osiągać nawet 10÷15% długości otworu strzałowego.

Zdecydowanie najsłabsze charakterystyki rozwoju detonacji zaobserwowano dla prób inicjowanych zapalnikiem położonym prostopadle do osi ładunku. Wspomniano już wcześniej, że jest to skrajny przypadek, do którego dojść może jedynie w wyjątkowych sytuacjach. Niemniej taki sposób inicjacji nie zapewni odpowiedniego impulsu energetycznego, na



Rys. 12. Porównanie przebiegów rozwoju prędkości detonacji w czasie przy różnych sposobach inicjacji (Seria III)
Fig. 12. Comparison of the VOD development in time with respect to various positions of the detonator (Series III)

co wskazują wygenerowane charakterystyki czas – prędkość. Co więcej, jedna z trzech prób inicjowanych tym sposobem nie zdetonowała, pomimo detonacji zapalnika.

Kontynuacja prac w zakresie określenia wpływu przestrzennego położenia środka inicjującego na zachowanie się materiału wybuchowego wydaje się być uzasadniona. Być może należałoby powrócić do koncepcji zapalnika lub pobudzacza, który z jednej strony umożliwiałby łatwe wprowadzanie materiału wybuchowego do otworu strzałowego i chronił przewody przed zniszczeniem podczas mechanicznego załadunku do otworów strzałowych, ale przede wszystkim zabezpieczał przed ruchem wstecznym zapalnika, co pozwoli na zatrzymanie go na dnie otworu przy jednoczesnym utrzymaniu go w osi otworu strzałowego.

Literatura

BAHADORI M., BAKHSHANDEHAMNIEH H. 2017 - Numerical Analysis of the Primer Location Effect on Ground Vibration Caused by Blasting, International Journal of Mining and Geo-Engineering, 51-1, pp. 53-62.
GUPTA R.N., ADHIKARI G.R., VENKATESH H.S., THERESRAJ A.I., VERMA H. K. 2001 - Evaluation of explosives performance through in-the hole detonation velocity measurement. National Institute of Rock Mechanics (India) – research work, Kolar Gold Fields.

JIMENO C.L., JIMENO E.L., AYALA CARCEDO F.J. - 1995 Drilling and Blasting of Rocks, Taylor & Francis Group.

MARANDA A., GOŁĄBEK B., KASPERSKI J. 2008 - Materiały wybuchowe emulsyjne, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

MERTUSZKA P., FULAWKA K., CENIAN B. 2017 - Pomiar prędkości detonacji ładunków MW w warunkach polowych z wykorzystaniem urządzeń Explomet-Fo-2000 oraz MicroTrap™, „Górnictwo Odkrywkowe”, R. 58, nr 1, s. 28-34.

MORAWA R., ONDERKA Z. 2013 - Górnicze środki strzałowe i sprzęt strzałowy, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Art.-Tekst, Kraków.

SOBALA J. 2006 – Nowe systemy inicjowania materiałów wybuchowych - zapalniki elektroniczne, Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, zeszyt specjalny, s. 199-210.

YAO G., ZHANG B., XIU G., BAI C., LIU P. 2013 - The critical energy of direct initiation and detonation cell size in liquid hydrocarbon fuel/air mixtures, Fuel, Vol. 113, pp. 331-339.

ZYGMUNT B., MARANDA A., BUCZKOWSKI D. 2007 - Materiały wybuchowe trzeciej generacji, Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2017

Artykuł akceptowano do druku 20.02.2018

Szanowni Czytelnicy!

Przypominamy o wznowieniu

prenumeraty „Przeglądu Górniczego”

Informujemy też, że od 2009 roku w grudniowym zeszycie P.G. zamieszczamy listę naszych prenumeratorów.