

POMIAR PRĘDKOŚCI DETONACJI WYBRANYCH PLASTYCZNYCH MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH

Streszczenie: w artykule przedstawiono doświadczalne metody badania prędkości detonacji materiałów wybuchowych – metodę czujników zwarciovych oraz metodę ciągłego pomiaru detonacji. Porównano wyniki pomiarów prędkości detonacji wyznaczone za pomocą obu metod. Zbadano prędkość detonacji wybranych plastycznych materiałów wybuchowych na bazie heksogenu (RDX) z różnymi dodatkami mało wrażliwych materiałów wybuchowych takich jak heksanitrostilben (HNS) i 3-nitro-1,2,4-triazol-5-on (NTO).

VELOCITY OF DETONATION MEASUREMENT FOR SOME PLASTIC BONDED EXPLOSIVES

Summary: experimental methods for velocity of detonation measurement were shown in article – ionization probes method and continuous measurement method. Results of detonation velocity determined with both methods were compared. Velocity of detonation was measured for some plastic bonded explosives with insensitive compositions RDX/heksanitrostilbene and RDX/3-nitro-1,2,4-triazole-5-one.

1. Wstęp

Plastyczne materiały wybuchowe, ze względu na bardzo korzystne właściwości reologiczne oraz stosunkowo prosty proces produkcji, zyskały sobie popularność zarówno w przemyśle zbrojeniowym jak i w technice cywilnej np. w metalurgii, górnictwie, procesach umacniania i tłoczenia metali. Przy ich zastosowaniu można uzyskać ładunki o dowolnym kształcie, wielkości a także odpowiednio dobrać właściwości użytkowe i wybuchowe (poprzez zmianę składu).

Już na początku lat pięćdziesiątych w USA prowadzono prace związane z zastąpieniem flegmatyzatorów pochodzenia naturalnego (używanych dotychczas w materiałach wybuchowych) tworzywami sztucznymi. Grupę materiałów wybuchowych (MW) zawierających tworzywa sztuczne nazwano Plastic Bonded Explosives (PBX). Podstawowymi komponentami PBX-ów są kruszące materiały wybuchowe (heksogen, oktogen, NTO, pentryt), lepiszcza (poliestry, poliuretany, kauczuki) i plastyfikatory (ftalan dioktylu, ftalan dibutyli, butylonitrofenyloamina). Plastyczne materiały wybuchowe mają bardzo ważną zaletę związaną z bezpieczeństwem ich stosowania, a mianowicie są mniej wrażliwe niż kruszący materiał wybuchowy, z którego zostały wykonane. PMW stosowane są wszędzie tam, gdzie potrzebna jest duża energia wybuchu przy jednoczesnej niskiej wrażliwości na bodźce zewnętrzne. Inną zaletą plastycznych materiałów wybuchowych jest

fakt niskiej toksyczności, zarówno poszczególnych składników, jak również gotowego produktu.[5]

Prędkość detonacji danego materiału wybuchowego jest podstawowym parametrem go charakteryzującym. Jest ona stała dla konkretnego ładunku MW uformowanego w powtarzalny sposób. Jej wartość zależy od wielu czynników: gęstości, średnicy ładunku, osłony ładunku, rozdrobnienia kryształów, jak również w przypadku mieszanin od zawartości składników oraz tekstury kompozycji. Metody określania prędkości detonacji można podzielić na teoretyczne (obliczeniowe) oraz doświadczalne (eksperymentalne). W eksperymentalnych metodach wyznaczania prędkości detonacji wykorzystuje się wyniki pomiaru czasu potrzebnego na pokonanie przez falę detonacyjną znanego odcinka w ładunku badanego materiału wybuchowego. Celem badań było dobranie najlepszej metody doświadczalnej do określonego typu materiałów wybuchowych.

2. Pomiar prędkości detonacji

Pierwsze pomiary prędkości detonacji stałych materiałów wybuchowych przeprowadzili Berthelot i Vieille w 1885 roku. Pomiar prędkości detonacji odbywał się na ścieżce materiału wybuchowego o długości 200 m przy użyciu chronografu. Aby wyeliminować używanie drogich i precyzyjnych aparatów pomiarowych Dautriche w 1906 roku zaproponował inną metodę. Jest to metoda pośredniego pomiaru prędkości detonacji a charakteryzuje się prostotą wykonania. Aby przeprowadzić badania tą metodą potrzebne są: ładunek materiału wybuchowego o długości co najmniej 0,3 m, lont detonujący długości ok. 2 m o znanej stałej prędkości detonacji, zapalniki elektryczne, rura metalowa, płyta ołowiana. W badany materiał wybuchowy wprowadzić należy końce lontu detonującego tak, aby rozsunięte były na maksymalnie dużą, możliwą do uzyskania odległość. Badany materiał wybuchowy pobudza się na jednym końcu przy użyciu zapalnika elektrycznego. Detonacja ładunku zainicjuje detonację lontu niejednocześnie w obu jego odgałęzieniach. Pierwszy zostanie zainicjowany koniec lontu detonującego położony bliżej zapalnika, następnie w toku przebiegu detonacji w ładunku zainicjowany zostanie drugi koniec lontu. Obie fale detonacyjne przebiegające w lonce spotkają się w punkcie, który przesunięty będzie w kierunku później pobudzonego końca lontu o pewien odcinek. Na podstawie długości tego odcinka, zaznaczonego na ołowianej płycie, wyliczana jest prędkość detonacji.

Innym sposobem pomiaru prędkości detonacji jest metoda zwarciowa. W tym przypadku czas potrzebny do pokonania przez front fali detonacyjnej znanej odległości między czujnikami rejestrowany jest za pomocą licznika elektronicznego. W ładunku MW, w znanych odległościach od siebie umieszczane są czujniki, które ze względu na sposób działania można podzielić na jonizacyjne lub zwarciove (elektrokontaktowe). W czujnikach jonizacyjnych wykorzystywane jest zjawisko przewodzenia prądu elektrycznego przez zjonizowane produkty detonacji. Docierająca do czujnika fala detonacyjna umożliwia zamknięcie obwodu elektrycznego. To umożliwia z kolei rozładowanie kondensatora, a związany z tym sygnał elektryczny włącza lub wyłącza urządzenie zliczające. Natomiast w czujnikach zwarciowych zamknięcie lub przerwanie obwodu elektrycznego spowodowane jest działaniem ciśnienia fali detonacyjnej. W tym badaniu ważne jest aby dystans między czujnikami był jak największy i aby odległość ta była możliwie najdokładniej zmierzona (zmniejsza to błąd pomiaru). Pierwszy czujnik powinien być umieszczony w takiej odległości od miejsca pobudzenia detonacji aby zapewnić rozwinięcie i ustabilizowanie procesu detonacji.

Kolejną metodą pomiaru prędkości jest metoda ciągła. Czujniki tego samego typu co w metodzie zwarciowej tzn. jonizacyjne lub elektronokontaktowe stosowane są również do ciągłego pomiaru prędkości detonacji. W tym przypadku badana jest zmiana oporu

elektrycznego czujników umieszczonych wzdłuż ładunku. Rejestruje się ją w sposób ciągły za pomocą oscyloskopu. Zmianę oporu powoduje zwieranie czujnika przez przesuwaną się w ładunku falę detonacyjną. Czujnik w tym pomiarze musi być zasilany prądem stałym. W czasie przebiegu procesu detonacji propagująca się fala zamyka obwód elektryczny, długość czujnika w sposób ciągły ulega skróceniu, powoduje to zmianę jego oporu a co za tym idzie i napięcia w obwodzie. Zmiana ta rejestrowana jest na oscyloskopie w funkcji czasu. Na podstawie otrzymanego oscylogramu możliwe jest określenie prędkości detonacji w każdej części ładunku. Jest to o tyle ważne, że w odróżnieniu od innych metod można zaobserwować jak detonacja rozwija się, stabilizuje i jak ulega wygaszeniu. Przy użyciu innych omówionych wcześniej sposobów pomiaru prędkości detonacji możliwe jest określenie tylko średniej jej wartości.

3. Przedmiot badań

Zbadano prędkość detonacji krystalicznego heksogenu oraz plastycznych materiałów wybuchowych na jego bazie. Ich składy podano w tabeli 1. Prędkość detonacji wyznaczono za pomocą dwóch metod: zwarciowej oraz ciągłej. Lepiszczce badanych PMW składało się z kauczuku butadienowo-styrenowego plastyfikowanego adypinianem dioktylu i olejem.

Tabela 1. Składy i gęstości badanych PMW

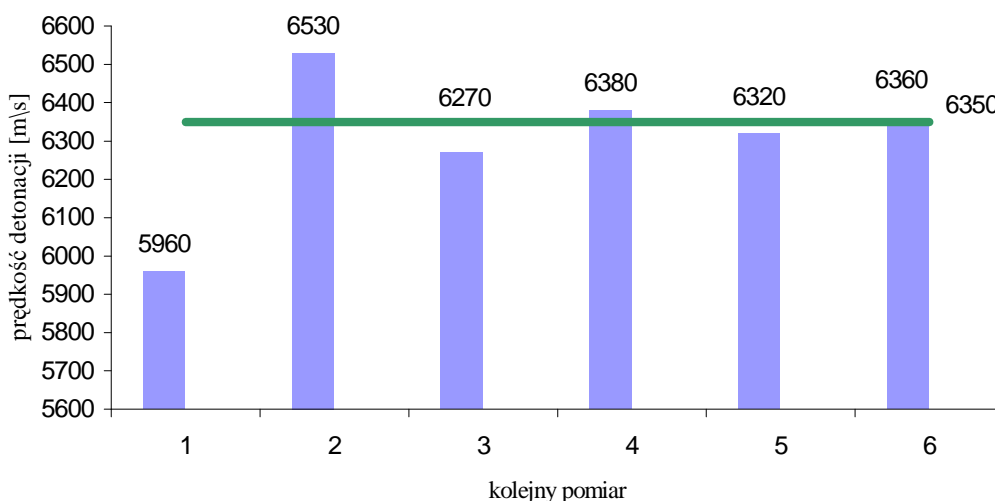
L.p.	Skład	Gęstość [g/cm ³]
1.	100 % RDX	1,10
2.	84% RDX, 16% lepiszcze	1,50
3.	74% RDX, 10% HNS, 16% lepiszcze	1,50
4.	64% RDX, 20% HNS, 16% lepiszcze	1,55
5.	64% RDX, 20% NTO, 16% lepiszcze	1,50
6.	44% RDX, 40% NTO, 16% lepiszcze	1,60

Podana w tabeli 1, wartość gęstości została wyznaczona za pomocą piknometru gazowego i jest średnią z trzech pomiarów. Jej wartość jest obarczona błędem $\pm 0,05$ g/cm³. W pomiarach prędkości detonacji krystalicznego RDX zastosowano ładunki w osłonie PCV, zaś ładunki PMW stosowano bez żadnych osłon. Masa ładunków wynosiła 0,25-0,35 kg.

4. Wyniki pomiarów

4.1. Pomiar prędkości detonacji heksogenu

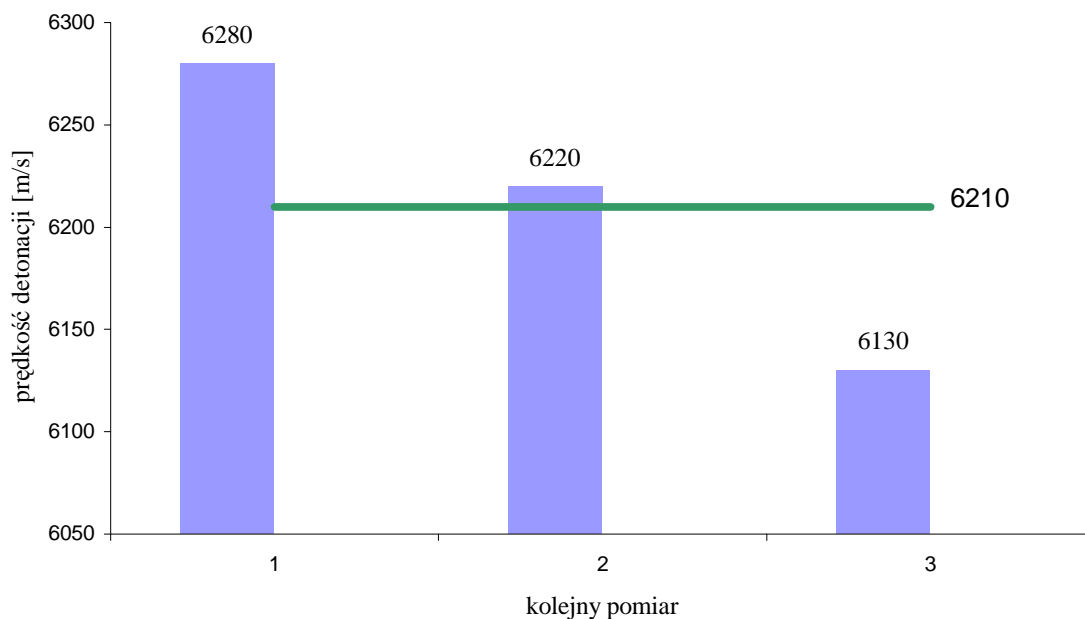
Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości detonacji heksogenu krystalicznego wykonane metodą zwarciową. W przeprowadzonych eksperymentach pokazano wpływ rozbiegu detonacji na jej pomiar.



Rysunek 1. Wyniki pomiarów prędkości detonacji RDX metodą zwarciovą

Rozbieg nie może być za krótki, gdyż otrzymane czasy z baz pomiarowych, a także wartości prędkości detonacji nie będą powtarzalne. Notuje się, w tym przypadku znaczne odchylenia, zarówno w obrębie trzech baz dla jednego pomiaru, jak i dla prędkości średnich z kilku pomiarów. Dla dłuższego detonatora pośredniego wyniki są porównywalne zarówno w obrębie jednego doświadczenia (3 bazy) jak i wyznaczone prędkości średnie dla kilku doświadczeń są porównywalne. Aby bardziej uwidocznili różnice otrzymane dla kolejnych pomiarów uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 1. Dla krótkiego detonatora pośredniego wykonano pomiary 1 - 3. Średnie prędkości detonacji różnią się o 570 m/s. Dla pomiarów 4-6 zastosowano dłuższy detonator pośredni i rozbieżności między prędkościami średnimi wynoszą 60 m/s a więc są prawie dziesięciokrotnie mniejsze. Zielona prosta to średnia z trzech ostatnich pomiarów (6350m/s).

Przy pomiarze prędkości detonacji metodą ciągłą stwierdzono, że z zanotowanego pomiaru napięcia w funkcji czasu daje się w prosty sposób wyznaczyć prędkość detonacji. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 2. Wyniki z dwóch pierwszych pomiarów są sobie bliskie ponieważ zakłócenia były nieznaczne. Natomiast w trzecim pomiarze uzyskana prędkość detonacji ma wartość niższą od dwóch pozostałych. Zakłócenia pomiaru (otrzymane na wykresie zależności napięcia w funkcji czasu) były zdecydowanie większe. Zieloną prostą na rysunku 2 zaznaczono prędkość średnią (6210 m/s).

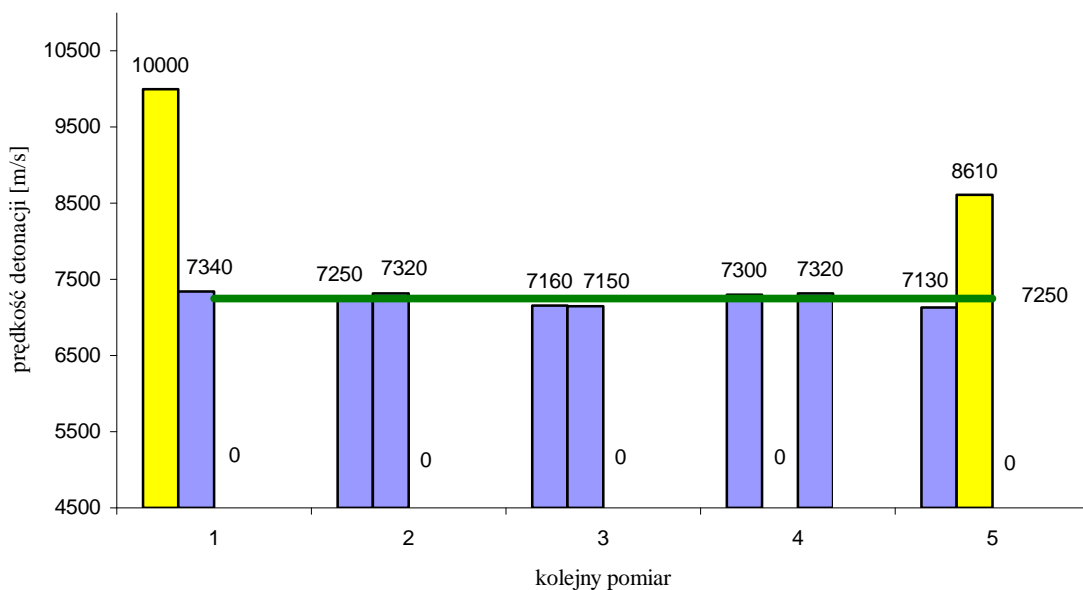


Rysunek 2. Wyniki pomiarów prędkości detonacji RDX metodą ciągłą

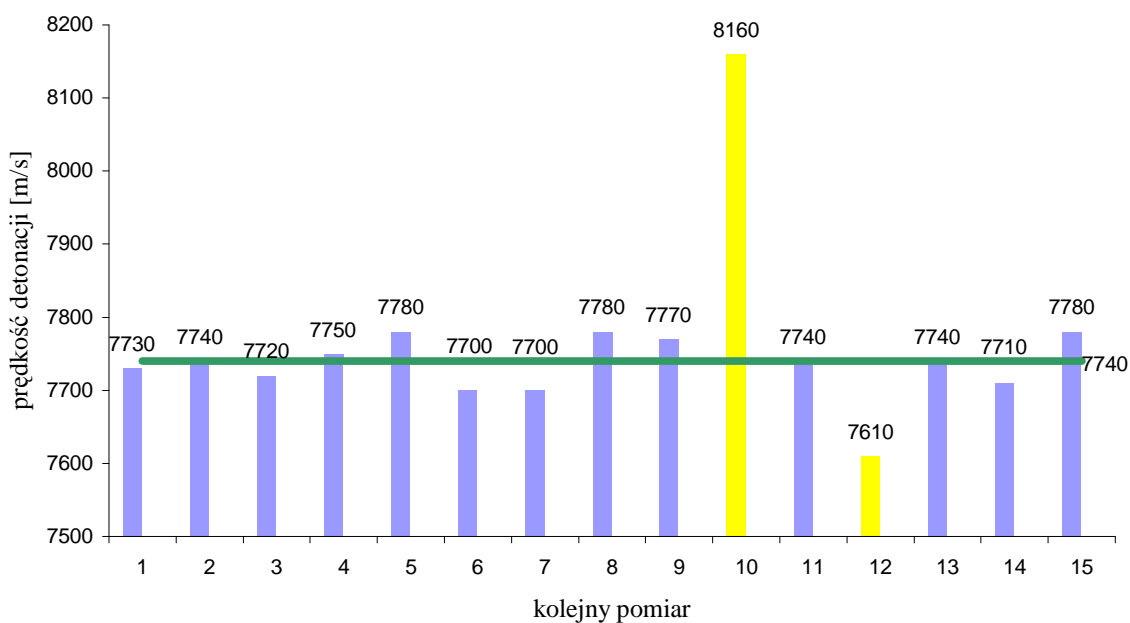
4.2. Pomiar prędkości detonacji PMW na bazie RDX

Uzyskane wyniki z badań plastycznego materiału wybuchowego na bazie heksogenu dla pomiarów wykonanych metodą zwarciovą przedstawia rysunek 3. Numerami 1 – 5 oznaczono kolejne doświadczenia. Na każde z nich składały się po trzy pomiary. Symbolem O oznaczono brak pomiaru w danym doświadczeniu. Obliczona średnia prędkość detonacji wynosi 7250 m/s (zielona prosta). Przy jej obliczaniu odrzucone zostały wyniki zaznaczone kolorem żółtym na wykresie. Różnica pomiędzy wartością średnią, a wartością najbardziej od niej oddaloną wynosi 120 m/s a więc 1,67 %. Na taką wielkość błędu pomiarowego największy wpływ ma pomiar długości bazy, który w przypadku plastycznych materiałów wybuchowych nie jest zbyt dokładny.

Na podstawie uzyskanych wyników przy pomiarze prędkości detonacji metodą ciągłą można stwierdzić, iż. prędkości detonacji uzyskane dla pomiaru 10 i 12 różnią się w znaczny sposób od pozostałych (kolor żółty na rysunku 4), więc zostały odrzucone. W obliczeniu średniej prędkości detonacji posłużono się trzynastoma wynikami (kolor niebieski na rysunku 4). Obliczona średnia prędkość detonacji wynosi 7740 m/s (zieloną prostą na rysunku 4), a różnica między tą wartością a najbardziej odległą wynosi 40 m/s, a więc około 0,5 % .



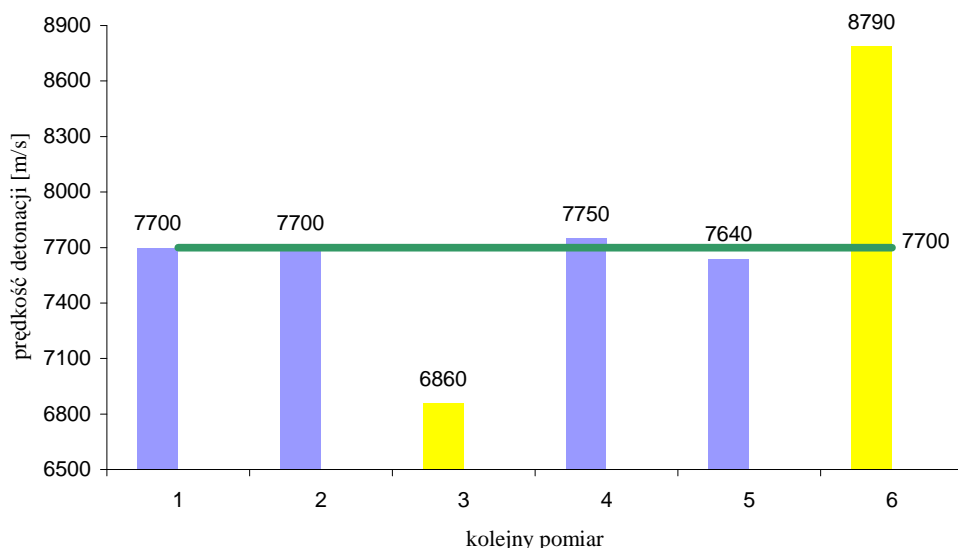
Rysunek 3. Wyniki pomiarów prędkości detonacji PMW na bazie RDX metodą zwarciovą



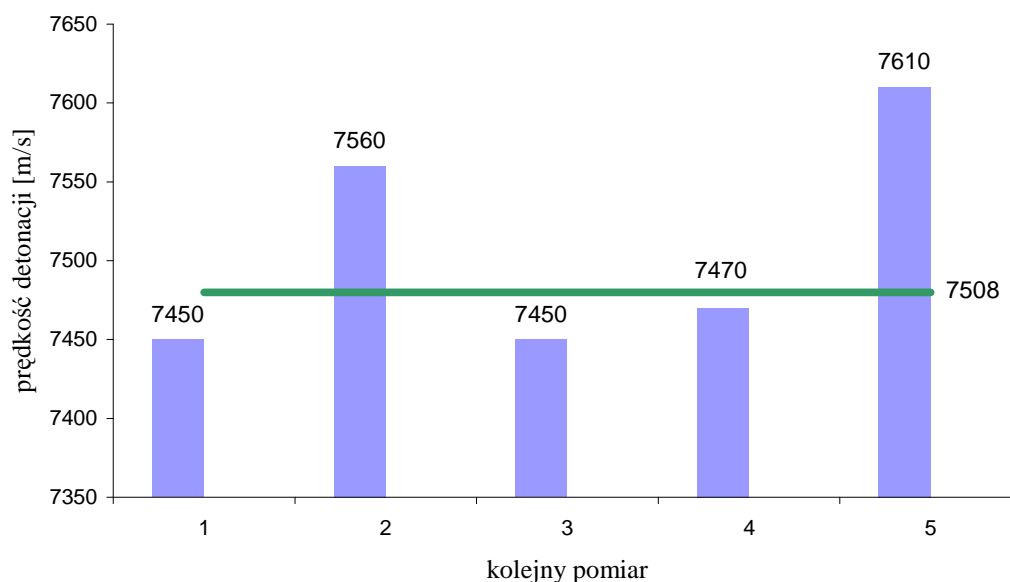
Rysunek 4. Wyniki pomiarów prędkości detonacji PMW na bazie RDX metodą ciągłą

4.3. Pomiar prędkości detonacji PMW na bazie RDX z dodatkiem HNS

Do obliczenia średniej prędkości detonacji (metodą ciągłą) plastycznego materiału wybuchowego na bazie RDX-u z 10% dodatkiem HNS-u, posłużono się czterema uzyskanymi wynikami. Obliczona średnia prędkość detonacji $D_{\text{sr}} = 7700\text{m/s}$ (zielona prosta na wykresie) jest oddalona od najdalszej wartości tylko o 60 m/s czyli o około 0,8 %.



Rysunek 5. Wyniki pomiarów prędkości detonacji PMW z 10 % dodatkiem HNS



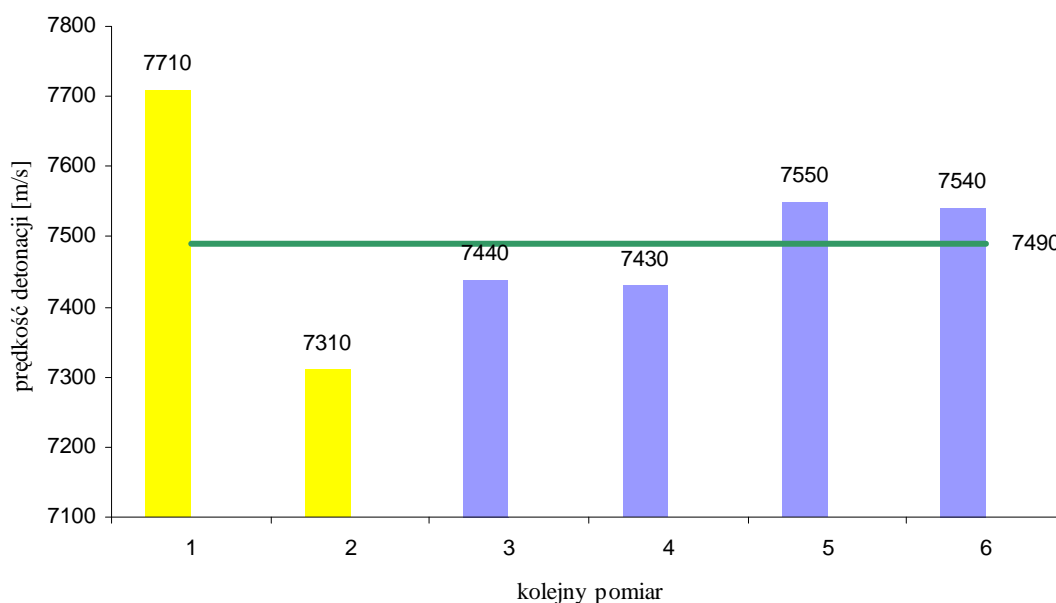
Rysunek 6. Wyniki pomiarów prędkości detonacji PMW z 20 % dodatkiem HNS

Do wyznaczenia średniej prędkości detonacji plastycznego materiału wybuchowego na bazie RDX-u z 20% dodatkiem HNS-u posłużono się pięcioma wynikami. Obliczona D_{sr} wynosi 7508 m/s, a różnica między tą wartością a najbardziej odległą wynosi 102 m/s a więc około 1,4 %.

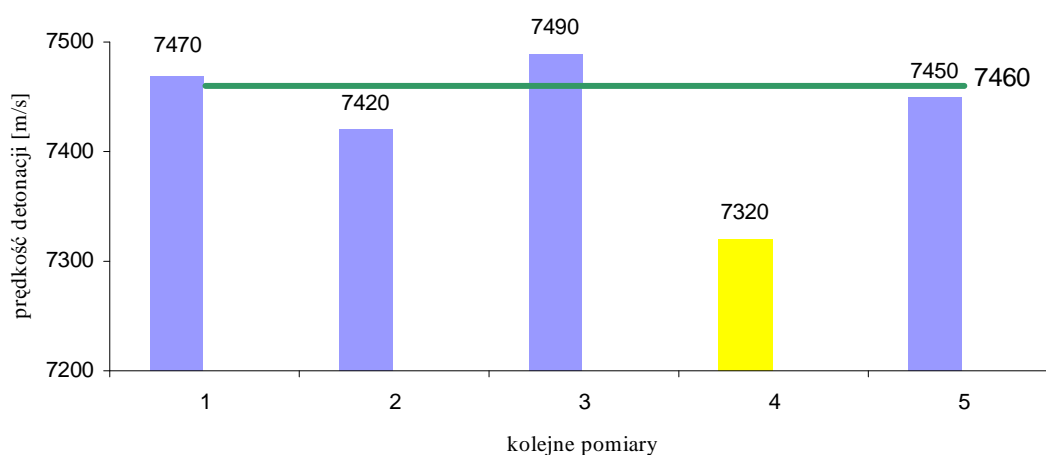
4.4. Pomiar prędkości detonacji PMW na bazie RDX z dodatkiem NTO

Wyniki pomiaru prędkości detonacji metodą ciągłą plastycznego materiału wybuchowego na bazie RDX-u z 20% dodatkiem NTO przedstawiono na rysunku 7. Dwa pierwsze pomiary przeprowadzone były w początkowej fazie eksperymentów, gdy metodyka pomiaru nie była jeszcze dopracowana i jak widać odbiegają one od pozostałych. Do wyznaczenia średniej prędkości detonacji posłużono się czterema pozostałymi wynikami

(kolor niebieski na rysunku 7). Obliczona D_{sr} wynosi 7490 m/s, a różnica między tą wartością, a najbardziej odległą wynosi 60 m/s a więc około 0,8 %.



Rysunek 7. Wyniki pomiarów prędkości detonacji PMW z 20 % dodatkiem NTO



Rysunek 8. Wyniki pomiarów prędkości detonacji PMW z 40 % dodatkiem NTO

Wyniki pomiaru prędkości detonacji metodą ciągłą plastycznego materiału wybuchowego na bazie RDX-u z 40% dodatkiem NTO przedstawiono na rysunku 8. W zasadzie uzyskane wyniki, poza 4 (kolor żółty na rysunku 8) są sobie bliskie. Uśredniając uzyskane wyniki (poza 4) otrzymano D_{sr} równą 7460 m/s. Różnica między tą wartością, a najbardziej od niej odległą wynosi 30 m/s a więc około 0,4%.

5. Podsumowanie

W tabeli 2 zebrano średnie wartości prędkości detonacji badanych plastycznych materiałów wybuchowych. Uzyskane wartości prędkości detonacji dla heksogenu

krystalicznego są zgodne z danymi literaturowymi - 6000-6330 m/s dla gęstości 1,00 – 1,10 g/cm³ [11],.

Tabela 2. Średnie prędkości detonacji badanych materiałów wybuchowych

L.p.	Skład	D [m/s] - metoda zwarciowa	D [m/s] - metoda ciągła
1.	100 % RDX	6350 ± 30	6210 ± 70
2.	84% RDX, 16% lepiszcze	7250 ± 120	7740 ± 40
3.	74% RDX, 10% HNS, 16% lepiszcze	-	7700 ± 60
4.	64% RDX, 20% HNS, 16% lepiszcze	-	7480 ± 70
5.	64% RDX, 20% NTO, 16% lepiszcze	-	7490 ± 60
6.	44% RDX, 40% NTO, 16% lepiszcze	-	7460 ± 30

Dla krystalicznych materiałów wybuchowych metoda zwarciowa oraz metoda ciągła pomiaru prędkości detonacji są porównywalne pod warunkiem dobrania właściwego rozbiegu detonacji. Błąd uzyskany metodą zwarciowa (dla trzech pomiarów) wynosi ok. 0,5%, podczas gdy dla metody ciągłej ok. 1 %. Nie jest to dużo, jeżeli pod uwagę weźmie się fakt, że wykonanie ładunków MW jest obciążone dużym błędem – zarówno pod względem rozkładu gęstości MW w badanym ładunku jak i niedokładności wykonywanych pomiarów baz i czujników.

Ze względu na metodykę wykonywania pomiarów metodą korzystniejszą w przypadku krystalicznych materiałów wybuchowych jest metoda zwarciowa:

- umieszczenie czujnika zwarciowego w ładunku jest prostsze,
- w przypadku uszkodzenia czujnik wymienia się łatwo i dość szybko,
- uzyskane tą metodą wyniki są do siebie bardzo zbliżone, i nie ma zakłóceń.

W przypadku metody ciągłej zarówno umieszczenie czujnika w ładunku krystalicznego materiału wybuchowego, jak i jego wymiana jest trudna i czasochłonna, a uzyskane wyniki mają większy rozrzut.

W przypadku wyników uzyskanych dla pomiarów PMW rozrzut wyników dla obu metod jest bardzo znaczący. Różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi dla pomiaru zwarciowego i ciągłego sięga prawie pięciuset metrów na sekundę. Zdecydowanie pewniejszym wynikiem jest ten uzyskany dla pomiaru ciągłego ponieważ:

- przeprowadzono 15 prób, a wyniki pominięte były tylko dwukrotnie (duża powtarzalność),
- łatwo zaobserwować przebieg zjawiska detonacji dla określonego materiału,
- nie ma trudności przy zamocowaniu czujnika czy jego wymianie,

Przy pomiarze prędkości detonacji metodą zwarciową dla plastycznego materiału wybuchowego na 27 pomiarów przygotowanych zmierzono 14. Związane to było z problemami z zamocowaniem czujnika w PMW.

W trakcie badań oceniono wpływ dodatku HNS na prędkość detonacji PMW. Zwiększenie ilości dodanego heksanitrostilbenu zmniejszyło prędkość detonacji. Nie zaobserwowano żadnych trudności z pobudzeniem ładunków, zaś zachodząca przemiana była całkowita. Wraz ze zmianą ilości NTO prędkość detonacji PMW nie zmieniła się w sposób znaczący, gdyż różnicę rzędu 30 m/s można uznać za mieszczącą się w granicach błędu pomiarowego.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w zależności od rodzaju materiału wybuchowego wygodne jest stosowanie różnych czujników do pomiaru prędkości detonacji. Dla plastycznych materiałów wybuchowych zdecydowanie lepszym rozwiązaniem jest pomiar metodą ciągłą ponieważ nie występują problemy związane z umocowaniem czujnika a powtarzalność wyników jest duża. Dla krystalicznych materiałów kruszących dobre wyniki daje metoda zwarciowa, co nie znaczy, że wyniki otrzymane metodą ciągłą są niewiarygodne. Jednakże pomiar zwarciowy, w tym przypadku, jest łatwiejszy do przygotowania jak i wykonania.

Nie bez znaczenia praktycznego są również składy PMW zaproponowane w pracy, gdyż uzyskiwane wyniki są bardzo obiecujące, zwłaszcza jeśli chodzi o dodatek NTO. Nie uzyskano w zasadzie dużego obniżenia prędkości detonacji w porównaniu z plastycznym heksogenem (obniżenie o 250 m/s). Co ciekawe, bez względu na to czy stosujemy dodatek 20% czy 40% NTO prędkość nie zmienia się.

Przy dodatku heksanitrostilbenu do plastycznego materiału wybuchowego zaobserwowano zmiany prędkości detonacji wraz ze zmianą ilości dodatku. Spowodowane jest to zapewne zbyt małym procentowym udziałem dodatku.

Literatura

- [1] D. Smoleński, *Detonacja materiałów wybuchowych*, Wyd. MON, Warszawa 1981,
- [2] A. Maranda, S. Cudziło, J. Nowaczewski, R. Trębiński, W. Trzeciński *Wojskowe materiały wybuchowe*, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000,
- [3] Z. Onderka *Praktyczne aspekty detonacji materiałów wybuchowych*, Mat. Konf. Technika strzelnicza w górnictwie, Jaszowiec 2001,
- [4] J. Majzlik, V. Dusik, *Detpar – the detonation parameters*, Pardubice 2002,
- [5] M. Sućeska, *Test methods for explosives*, Springer, New York 1995,
- [6] S. Cudziło, J. Paszula, R. Trębiński, W. Trzeciński, E. Włodarczyk, *Badania właściwości detonacyjnych plastycznego materiału wybuchowego z dodatkiem α BN*, Biuletyn WAT, 6/1991,
- [7] J. Kohler, R. Meyer, *Explosives*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1993,
- [8] PN-C-86027 *Materiały wybuchowe – Oznaczanie prędkości detonacji*,
- [9] PN-C-86030 *Materiały wybuchowe – Oznaczanie zdolności przenoszenia detonacji*.