

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2015, 7, 95 – 105

ISSN 2083-0165

Badanie procesu rozwoju detonacji nieidealnych materiałów wybuchowych

Study of the detonation development of non-ideal explosives

Józef Michał Paszula^{*}, Emil Kowalewski

Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, PL

^{}E-mail: jozef.paszula@wat.edu.pl*

Streszczenie: *W pracy przedstawiono wyniki badania rozwoju detonacji w ładunkach materiałów wybuchowych amonowosaletrzanych o różnej zawartości dodatku aluminium oraz inicjowanych falą uderzeniową o różnej intensywności. Rozwój detonacji rejestrowany był poprzez ciągły pomiar prędkości detonacji przy wykorzystaniu czujnika zwarciovego.*

Abstract: *The paper presents the study results of the development of detonation in the charges of ammonium nitrate explosives with different content of aluminum powders and initiated by shockwave of varying intensity. The development of detonation was recorded by continuous measurement of the detonation velocity using a short-circuit sensor.*

Słowa kluczowe: *materiały wybuchowe amonowosaletrzane, prędkość detonacji, pomiar ciągły*

Keywords: *ammonium nitrate explosives, detonation velocity, continuous measurement*

1. Wstęp

Nieidealne materiały wybuchowe (NMW) ze względu na dostępność składników, ich relatywnie mały koszt, oraz specyficzne właściwości są przedmiotem zainteresowania badaczy. Niskie parametry detonacji oraz możliwość ich regulowania poprzez zmianę ilości oraz zawartości składników oraz dodatków, bardzo często stają się atutem takich materiałów w różnych aplikacjach. Bardzo istotne jest badanie procesu rozwoju detonacji w celu określenia mechanizmów prowadzących do powstania stacjonarnej fali detonacyjnej.

NMW lub mieszaniny wybuchowe charakteryzują się tym, iż strefa reakcji chemicznej jest zdecydowanie szersza niż w przypadku idealnych materiałów wybuchowych (IMW) [1]. Wielkość tej strefy może powodować zdecydowanie większy wpływ powierzchni swobodnych ładunku na stopień przereagowania MW, a co za tym idzie najczęściej zwiększenie średnicy krytycznej [2].

Kompozycje na bazie pyłu aluminiowego oraz soli nitrowych, np. azotanu(V) amonu (AN), są przykładem nieidealnych mieszanin wybuchowych [3]. Dla NMW bardzo często średnice krytyczne ładunków są wysokie, np. dla czystej saletry amonowej (NH_4NO_3) wynosi 100 mm, a dla amonalu o składzie 80% NH_4NO_3 i 20% Al wynosi 12 mm. Wielkości te znacznie przewyższają średnicę krytyczną idealnego materiału wybuchowego jakim jest np. heksogen, wynoszącą $1,0 \div 1,5$ mm [4].

Istotną rolę w rozwoju stacjonarnej fali detonacyjnej w ładunkach nieidealnych materiałów wybuchowych odgrywa sposób inicjacji ładunku. Użycie pobudzacza powoduje wygenerowanie fali uderzeniowej wnikażącej w ładunek materiału wybuchowego. W przypadku inicjowania heterogenicznych, porowatych MW, za propagującą się falą powstają obszary, w których lokalnie wydzieliło się więcej energii niż średnio w ich otoczeniu. Takie obszary nazywane są często gorącymi punktami. Wydzielająca się energia cieplna powoduje wzrost ciśnienia i generowane są fale sprężeniowe propagujące się w stronę fali uderzeniowej podtrzymując ją. Jeżeli w wyniku reakcji odpowiednia ilość energii zostanie przekazana do frontu fali, osiągnięte zostaną

warunku konieczne do powstania fali detonacyjnej [5].

W pracy [6] badano zależność pomiędzy impulsem inicjującym, a odległością od płaszczyzny inicjowania, w jakiej ustala się stacjonarna fala detonacyjna. Dla mieszaniny AN z trinitrotoluenem (TNT) oraz pyłu aluminiowego, przeprowadzono pomiary prędkości detonacji wykorzystując metodę czujników zwarciovych i wykonując pomiary na kolejnych 10 bazach.

Czujniki (11 szt.) umieszczono w cylindrycznym ładunku (o średnicy 65 mm i długości 330 mm) co 30 mm, przy czym pierwszy umieszczony został pod pobudzaczem. Pozwoliło to na zarejestrowanie zmian średniej prędkości detonacji na mierzonych kolejnych bazach wzdłuż osi ładunku. Dzięki temu zaobserwowane zostały zmiany prędkości detonacji w zależności od wielkości pobudzacza (użyto 2 typy pobudzaczy heksogenowych: 25 g o średnicy 30 mm oraz 100 g o średnicy 40 mm).

Wykorzystując mieszaniny o różnym składzie (tabela 1) oraz różne impulsy pobudzające, uzyskano zależności prędkości detonacji w funkcji odległości od płaszczyzny pobudzenia.

Tab. 1. Składy mieszanin AN/TNT/Al wyrażone w %mas. [6]

Skład badanych MW	AN/TNT-1	AN/TNT-2	AN-TNT/Al-1	AN-TNT/Al-2
Azotan(V) amonu (AN)	80	80	80	80
Granulowany TNT	20	-	10	10
Płatkowany TNT	-	20	-	-
Płatkowane Al	-	-	10	-
Proszek Al	-	-	-	10

Autorzy pracy zauważyli, że w każdym przypadku wielkość detonatora wpływa na sposób i szybkość osiągnięcia parametrów stacjonarnej detonacji i nie wpływa na jej wartość. Droga potrzebna do osiągnięcia parametrów stacjonarnej fali jest krótsza dla materiału z dodatkiem TNT granulowanego niż płatkowanego. Może to być spowodowane dodatkowymi obszarami niejednorodności wprowadzanymi przez granulowany TNT, które mogą być źródłem powstania dodatkowych gorących punktów.

W przypadku mieszanin z dodatkiem aluminium rozdrobnienie ziaren dodatku przyspiesza osiągnięcie parametrów stacjonarnej detonacji. Jednak jego rodzaj nie wpływa na końcowe parametry stacjonarnej fali detonacyjnej.

W pracy [7] przy wykorzystaniu interferometru mikrofalowego obserwowano zmianę prędkości fali detonacyjnej po wejściu fali uderzeniowej do ładunku NMW. Do badań wykorzystane zostały mieszaniny AN z dodatkami olei. Zaobserwowano powolny spadek prędkości propagacji fali uderzeniowej po wejściu do ładunku NMW i na pewnej głębokości po wniknięciu fali uderzeniowej osiągane są parametry stacjonarnej fali detonacyjnej.

W pracy [8] badano rozwój procesu detonacji w mieszaninie AN z dodatkiem węgla aktywnego. W układzie pomiarowym dokonywano pomiaru prędkości detonacji na sześciu bazach co pozwoliło na określenie zmian prędkości w zależności od odległości od powierzchni pobudzenia.

2. Badane materiały

2.1. Proszki aluminium

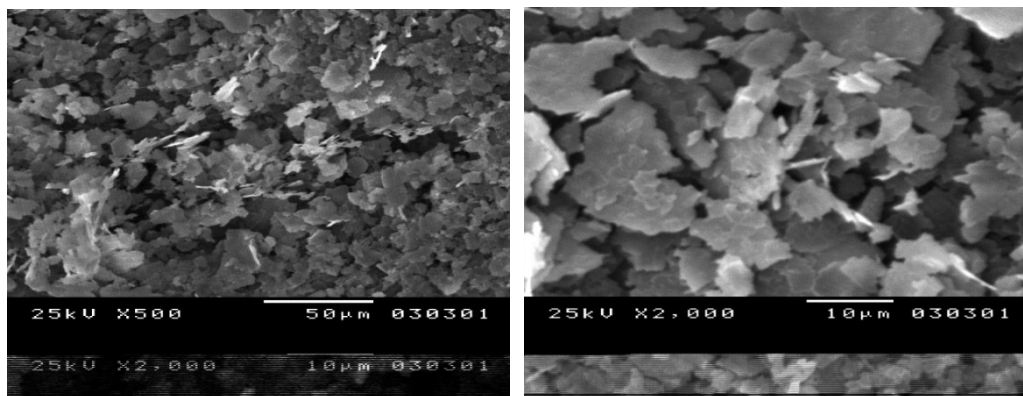
W celu realizacji pracy wytypowano sześć kompozycji wybuchowych opartych na azotanie(V) amonu z różną zawartością dodatku aluminium oraz łuskowanego TNT. Dla każdej kompozycji wykonano serię pomiarów prędkości detonacji z wykorzystaniem metody pomiaru ciągłego i punktowego.

Do przygotowania kompozycji wybuchowych wykorzystano dwa rodzaje proszków aluminium produkcji Benda-Lutz Skawina Sp. z o.o. Podstawowe właściwości wykorzystanych proszków przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Podstawowe właściwości wykorzystywanych w badaniach proszków aluminiowych

Właściwość proszku	Jednostka	Oznaczenie proszku	
		Al-p	Al-f
Oznaczenie katalogowe	-	7313	3083
Średni wymiar cząstek	[μm]	65	12
Pozostałość na sicie	[Mesh] / [%]	125 / 1	325 / 0,8
Powierzchnia krycia	[cm^2/g]	5000	29000
Gęstość nasypowa	[kg/dm^3]	0,2	0,4

Na rys. 1 przedstawione zostały zdjęcia z mikroskopu skaningowego proszku 3083. Jak widać na zdjęciach, próbka ma formę płatków o rozmiarach około 10 μm .

**Rys. 1.** Zdjęcia z mikroskopu skaningowego proszku 3083

2.2. Azotan(V) amonu

Do badań wykorzystano AN w postaci rozdrobnionej, przesiany przez sito o rozmiarze oczek 800 μm . Utleniacz poddano suszeniu w cieplarni w podwyższonej temperaturze. Jak wynika z analizy granulometrycznej około 70% ziaren saetry amonowej ma wymiar poniżej 300 μm .

2.3. Skład badanych mieszanin materiałów wybuchowych nieidealnych

Mieszanki wybuchowe przygotowywane były poprzez mechaniczne mieszanie wcześniej odważonych składników. Składy testowanych mieszanin podano w tabeli 3.

Tab. 3. Składy masowe mieszanin wykorzystywanych w badaniu rozwoju stacjonarnej detonacji

Skład MW	Zawartość [%]					
	Amonal I			Amonal II	Amonal III	
Azotan (V) amonu	98	95	90	90	85	80
Al-p	2	5	10	-	10	10
Al-f	-	-	-	10	-	-
TNT	-	-	-	-	5	10

Pobudzenie ładunku realizowano za pomocą dwóch inicjatorów o różnej intensywności:

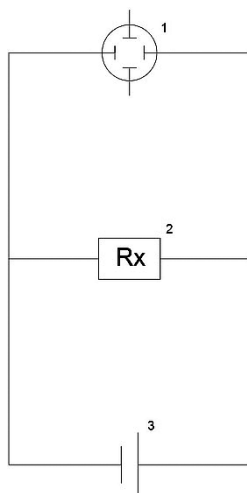
- zapalnik elektryczny typu ERG;
- zapalnik elektryczny ERG + detonator heksogenowo-glinowy o masie około 24 g wykonany z prasowanej kompozycji A-IX-2 (73% Hx, 23% Al, 4% воск).

3. Metodyka badań

3.1. Ciągły pomiar prędkości detonacji

W badaniach wykorzystano ciągły pomiar prędkości detonacji przy wykorzystaniu czujnika zwarciovego wykonanego z miedzianego, emaliowanego drutu nawojowego o średnicy 150 μm . Opór właściwy drutu wyznaczony doświadczalnie wynosi 0,96 Ω/m . Czujniki do pomiaru punktowego zostały przygotowane poprzez skręcenie drutu o długości 160 cm. Czujnik z drutu nawojowego umieszczany był w osłonie z folii cynowej w celu wzmocnienia efektu zwarcia skręconych drutów nawojowych. Na tym etapie czujnik był skracany do wymaganej długości.

Ideowy schemat elektryczny pomiaru ciągłego prędkości detonacji przedstawiony został na rys. 2. Przy pomocy oscyloskopu obserwowano zmiany napięcia w funkcji czasu powodowane przez zmieniający się opór czujnika, spełniającego, w trakcie pomiaru, funkcję rezystora (rys. 2).

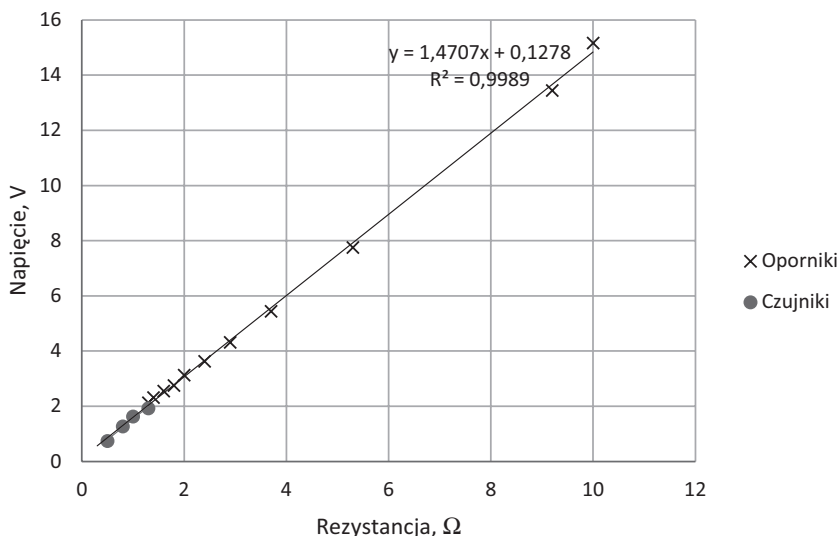


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do pomiaru ciągłego prędkości detonacji: 1 – oscyloskop; 2 – czujnik zwarciovzy o zmieniającym się oporze; 3 – źródło prądu stałego

W pomiarach wykorzystany został oscyloskop cyfrowy Agilent 54622A, impulsowy zasilacz stałoprądowy PGS 685 oraz komputer do archiwizacji uzyskanych przebiegów napięciowych mierzonych na czujniku zwarciovym.

3.2. Kalibracja układu pomiarowego dla pomiaru ciągłego

Kalibracja układu ma na celu poznanie charakterystyki układu zasilającego. Została ona przeprowadzona z wykorzystaniem rezystorów o różnej wartości rezystancji. Biorąc pod uwagę zakres oporów wykorzystywanych w badaniach czujników kalibrację układu zasilającego przeprowadzono w zakresie zmiennej wartości oporności $0 \div 10 \Omega$. Uzyskano w ten sposób charakterystykę napięcia mierzonego na czujniku przy zmiennej rezystancji i stałym prądzie zasilającym (rys. 3).



Rys. 3. Zmiana napięcia w funkcji rezystancji (zakres 0-10 Ω) dla układu ciągłego pomiaru prędkości detonacji

Na powyższym wykresie (rys. 3) wyraźnie widoczna jest liniowa zależność napięcia od rezystancji czujnika. Po przeprowadzeniu analizy wykresu uzyskano równanie linii prostej kalibracyjnej. Równanie ogólne prostej kalibracyjnej można przedstawić w postaci równania

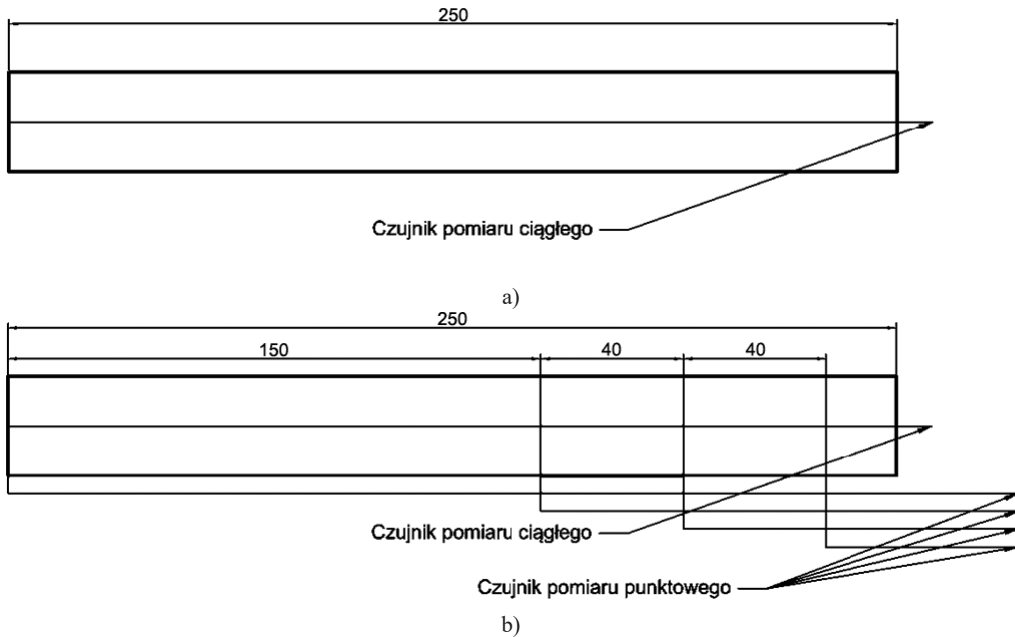
$$U = IR_x + b \quad (1)$$

gdzie: U – napięcie mierzone na końcówkach czujnika; I – prąd zasilacza; R_x – zmienna rezystancja (czujnika); b – parametr wynikający z oporu układu.

Wartość prądu zasilającego, odczytana z równania opisującego prostą kalibracyjną, jest równa współczynnikowi kierunkowemu prostej i wynosi $I = 1,4707$ A. Wyznaczona w ten sposób wartość natężenia prądu zasilającego wykorzystana została do analizy uzyskanych przebiegów eksperymentalnych. Na wykresie umieszczone zostały również wyniki pomiarów napięcia uzyskane dla rzeczywistych czujników o różnej rezystancji, wynikającej z różnej ich długości. Jak widać, dobrze zgadzają się z krzywą kalibracyjną uzyskaną dla układu z rezystorami.

3.3. Konstrukcje ładunków do pomiaru prędkości detonacji

Obudowy ładunków wykonano z rur PCW o średnicy wewnętrznej 27 mm i długości równej 250 mm. W rurkach umieszczano osiowo czujnik zwarciový do pomiaru ciągłego prędkości detonacji oraz czujniki do pomiaru prędkości detonacji z wykorzystaniem metody czujników zwarciových. Na rys. 4 przedstawione zostały schematy układów pomiarowych prędkości detonacji.

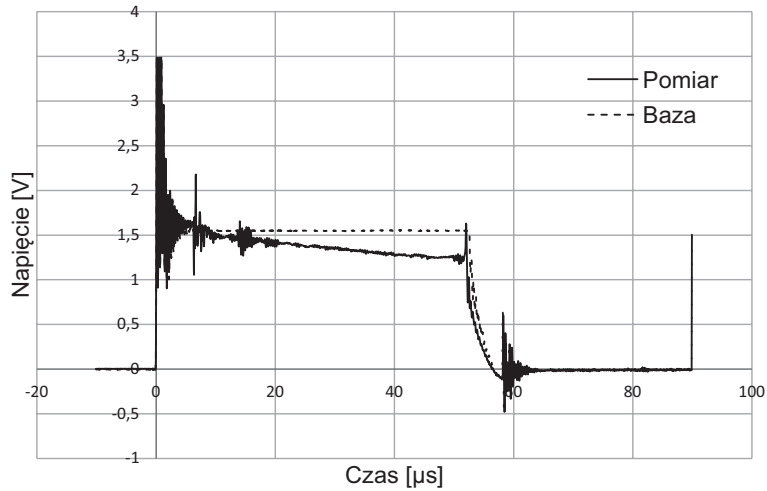


Rys. 4. Schemat układu pomiarowego. a) układ do pomiaru ciągłego; b) układ do jednoczesnego pomiaru ciągłego i punktowego

4. Wyniki pomiarów i ich analiza

Pomiary prędkości detonacji z wykorzystaniem metody ciągłej przeprowadzono kilkakrotnie dla każdego rodzaju wytypowanego do badań materiałów wybuchowych. Na rys. 5 przedstawione zostały przykładowe rejestracje uzyskane dla ładunku Amonal I z 2% zawartością pyłu aluminiowego. Na wykresie przedstawiono dwie charakterystyki napięciowe uzyskane dla czujnika przed detonacją oraz przebieg uzyskany dla tego samego czujnika w trakcie detonacji. Spadek napięcia rejestrowanego w trakcie eksperymentu spowodowany jest skracaniem czujnika w wyniku ciągłego zwierania go przez poruszającą się falę detonacyjną.

Jak wynika z rys. 5 zasilacz pozwala na zasilenie układu na okres około 50 μs , przy czym zaburzenia powstałe podczas próby w początkowym okresie ustalania napięcia znamionowego powodują skrócenie tego okresu do około 45 μs . Wykorzystując te charakterystyki można jednak przeprowadzić analizę zmian prędkości skracania czujnika, co równoważne jest wielkości prędkości detonacji fali propagującej się wzdłuż ładunku.



Rys. 5. Wykres dla pomiaru ciągłego, amonal I 2%

Ażeby ustalić na podstawie charakterystyk napięciowych pomiarów ciągłych prędkości detonacji należy zauważyć, że dla czujnika wykonanego z drutu nawojowego o oporze właściwym ρ , i początkowej długości l_0 chwilowa wielkość rezystancji czujnika R_x będzie wyrażona za pomocą równania

$$R_x = \rho(l_0 - Dt) \quad (2)$$

gdzie: D – prędkość detonacji, t – czas. Wynika stąd, że napięcie chwilowe czujnika U będzie równe

$$U = I\rho(l_0 - Dt) \quad (3)$$

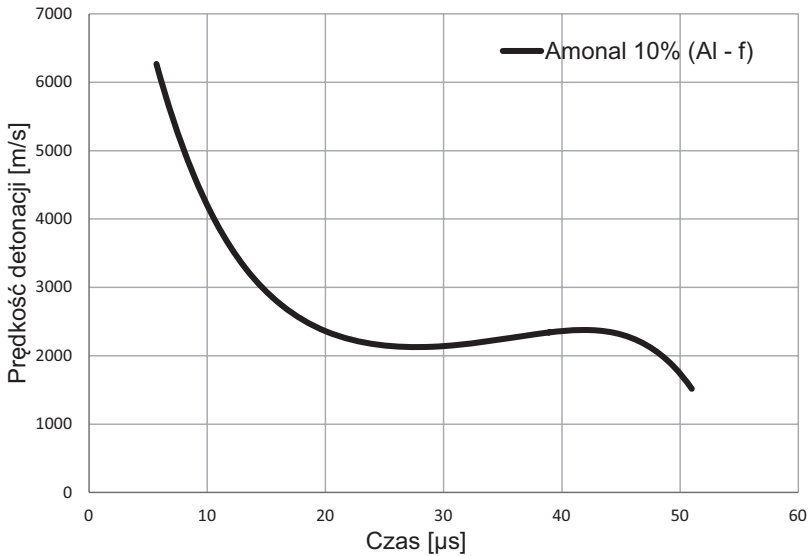
wobec tego chwilową prędkość propagacji fali detonacyjnej będzie można wyznaczyć ze wzoru

$$D = -\frac{1}{I\rho} \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

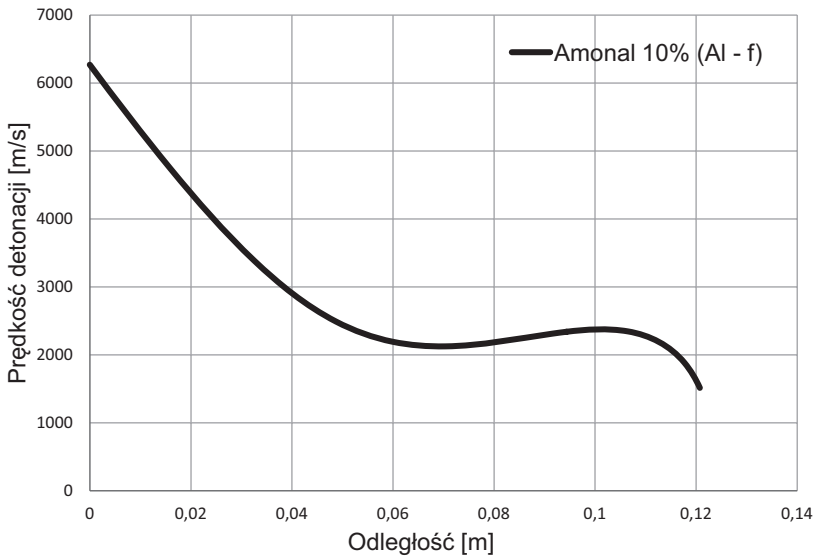
Dodatkowo, możliwe jest również ustalenie odległości (x) fali od początku ładunku

$$x = \frac{AU}{I\rho} \quad (5)$$

Analizę uzyskanych wyników pomiarów rozpoczęto dla przebiegów po usunięciu punktów odpowiadających przedziałom niestabilnej pracy zasilacza. Zależność napięcia mierzonego na czujniku w funkcji czasu aproksymowano wielomianem 6-tego stopnia. Prędkość chwilową można zatem określić na podstawie pochodnej wielomianu opisującego przebieg zmiany napięcia w trakcie pomiaru. Wyniki obliczeń prędkości detonacji przedstawione zostały w zależności od czasu i odległości od płaszczyzny pobudzenia na rys. 6 i 7.

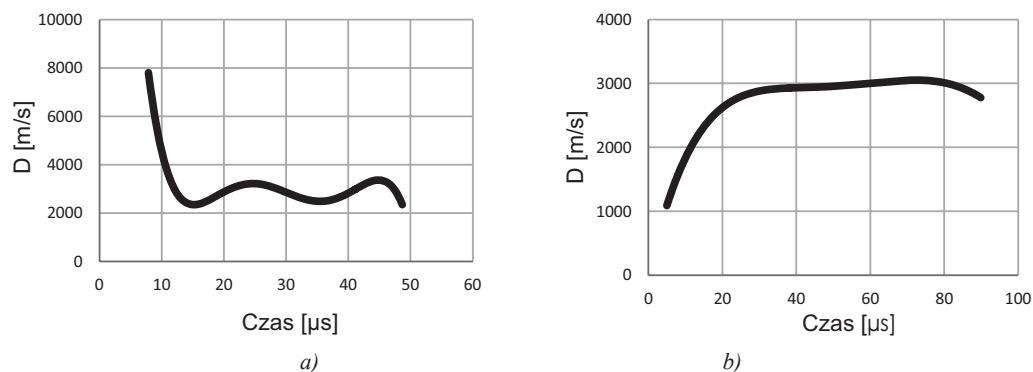


Rys. 6. Zmiana prędkości w funkcji czasu dla amonalu II 10%



Rys. 7. Zmiana prędkości w funkcji odległości od początku ładunku dla amonalu II 10%

Interesujące są wyniki uzyskane dla amonalu I z dodatkiem 10% Al-p przedstawione na rys. 8. W wyniku pobudzenia detonacji badanego ładunku za pomocą pobudzacza Hx/Al mamy w początkowym okresie szybki spadek rejestrowanej prędkości detonacji (rys. 8a) i ustalenie jej na poziomie około 3000 m/s. W przypadku pobudzenia za pomocą jedynie zapalnika elektrycznego w początkowym okresie następuje stopniowy wzrost rejestrowanej prędkości i ustalenie jej na poziomie również 3000 m/s (rys. 8b).



Rys. 8. Zależność prędkości od czasu dla amonalu I z dodatkiem 10% Al inicjowanego za pomocą pobudzacza Hx/Al, (a) i tylko zapalnika ERG (b)

Przedstawione wyniki pomiarów prędkości detonacji pozwalają zauważyć, że po początkowym etapie szybkiego spadku, prędkość detonacji stabilizuje się na pewnym poziomie. W zależności od rodzaju badanego materiału wybuchowego obszar stabilizacji prędkości detonacji charakteryzuje się mniejszymi lub większymi wahaniami jej wartości. Należy zwrócić uwagę, że mniejsze wahania wartości prędkości detonacji występują dla mieszanin wybuchowych opartych na aluminium płatkowanym o większym rozdrobieniu ziaren i dużej powierzchni krycia. Dla mieszaniny z dodatkiem wysokoenergetycznego materiału wybuchowego w postaci łuskowanego trotylu wahania prędkości są również mniejsze niż dla mieszaniny zawierającej dodatek aluminium w postaci proszku. Widoczny jest w początkowym okresie szybki spadek prędkości detonacji, której początkowa wysoka wielkość wynika z silnego impulsu pobudzającego pochodzącego od pobudzacza Hx/Al. W następnym etapie następuje stabilizacja prędkości detonacji na pewnym poziomie po około 15 μs, co odpowiada odległości około 5-7,5 cm od początku ładunku wybuchowego. Dodatkowo w przypadku rejestracji uzyskanej dla ładunku pobudzanego za pomocą tylko zapalnika, nastąpiło ponowne wyzwolenie zasilania czujnika w trakcie detonacji co pozwoliło na wyznaczenie prędkości detonacji w dłuższym okresie czasu.

Wykorzystując fakt, że po około 15 μs od początku rejestracji, proces detonacji osiąga okres względnie stabilnej wartości można przeprowadzić próbę określenia wartości średniej prędkości detonacji. Wykorzystując całkowite twierdzenie o wartości średniej przedstawione równaniem (6), można przeprowadzić wyznaczenie wartości średniej.

$$\bar{D} = \frac{1}{b-a} \int_a^b D(t) dt \quad (6)$$

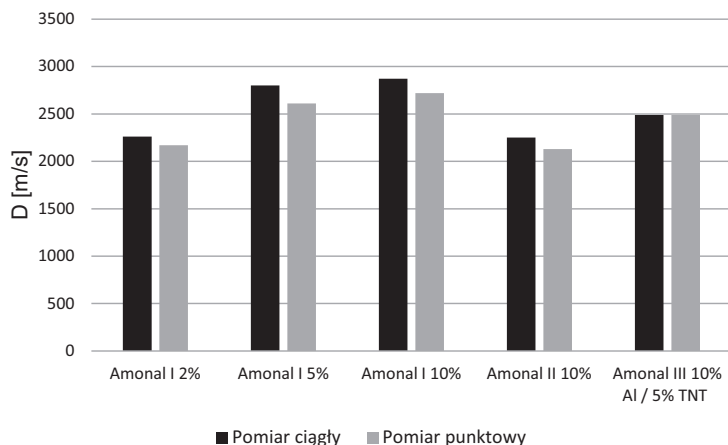
W tabeli 4 przedstawiono wyznaczone w ten sposób wielkości średnie prędkości detonacji dla badanych MW. Dodatkowo zamieszczono wielkości średnie prędkości detonacji wyznaczone metodą punktową na bazie umieszczonej w odległości od 150 mm do 230 mm od początku ładunku czyli w części ładunku gdzie następuje stabilizacja procesu propagacji fali detonacyjnej.

Tab. 4. Porównanie prędkości detonacji uzyskanych z wykorzystaniem metody pomiaru ciągłego (\bar{D}_c) i punktowego (\bar{D}_p)

Badany MW	\bar{D}_c [m/s]	\bar{D}_p [m/s]
Amonal I 2%	2260	2170
Amonal I 5%	2800	2610
Amonal I 10%	2870	2720
Amonal II 10%	2250	2130
Amonal III 10% Al / 5% TNT	2490	2490

Na rys. 9 przedstawione zostały w formie wykresu kolumnowego wyniki pomiaru prędkości detonacji zamieszczone w tabeli 4. Widać dobrą zgodność wyników pomiaru uzyskaną za pomocą obu metod. Różnice jakie można zaobserwować są związane prawdopodobnie z wahaniami prędkości detonacji wzdłuż osi ładunku wynikającymi z niejednorodności badanych kompozycji.

Dla wszystkich przypadków prędkość detonacji określona metodą punktową na odcinku od 150 mm do 230 mm od początku ładunku jest niższa niż określona metodą pomiaru ciągłego po ustaleniu się prędkości detonacji.



Rys. 9. Porównane wyniki pomiaru ciągłego i punktowego prędkości detonacji

5. Podsumowanie i wnioski

Wyniki pomiaru ciągłego poddane analizie pozwoliły na uzyskanie zależności prędkości detonacji od czasu oraz odległości od powierzchni pobudzenia. Przykładowe wyniki przedstawiono na wykresach (rys. 6 i 7) uzyskując obraz chwilowej prędkości propagacji fali w zależności od czasu lub odległości od początku ładunku.

Wyniki pomiaru zmian prędkości detonacji badanych MW przy wykorzystaniu pobudzenia o różnej sile wykazały silną zależność od siły pobudzenia. Widoczny jest inny charakter zmian prędkości zwierania czujnika w początkowym okresie rozwoju detonacji. Zarejestrowano spadek tej prędkości dla przypadku pobudzenia przy wykorzystaniu detonatora i wzrost w przypadku zainicjowania ładunku samym zapalnikiem.

Uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń prędkości detonacji pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- wykorzystana w pracy metoda pomiaru ciągłego prędkości detonacji pozwala na obserwację rozwoju detonacji w strefie bliskiej punktu pobudzenia;
- rejestracja zmian napięcia wykorzystywanego czujnika ciśnienia pozwala na określenie chwilowej prędkości detonacji (prędkości zwierania czujnika);
- metoda pomiaru ciągłego prędkości detonacji jest wystarczająco czuła, aby można było obserwować zmiany prędkości detonacji wzdłuż ładunku badanego MW.

Literatura

- [1] Needham E. Charles. 2010. *Blast Waves*. 303-304, Berlin Heidelberg : Springer.
- [2] Janesheski S. Robert, Groven J Lori, Son F. Steve. 2011. “*Detonation failure characterization of non-ideal explosives*”. 7th Biennial Conference of the American-Physical-Society-Topical-Group on Shock Compression of Condensed Matter Location, Chicago, USA.
- [3] Keshavarz Mohammad Hossein. 2009. “Simple Correlation for Predicting Detonation Velocity of Ideal and Non-Ideal Explosives”. *Journal of Hazardous Materials* 166 (2-3) : 762-769.

- [4] Włodarczyk Edward. 1995. *Podstawy detonacji*. Tomy I, II, Warszawa : Wyd. WAT.
- [5] Maranda Andrzej. 2010. *Przemysłowe materiały wybuchowe*. Warszawa : Wyd. WAT.
- [6] Cudziło Stanisław, Maranda Andrzej, Nowaczewski Jerzy, Trzciniński A. Waldemar. 1995. "Shock Initiation Studies of Ammonium Nitrate Explosives". *Combustion and Flame* 102 : 64-72.
- [7] *Teledyne Technologies Incorporated*. [Online]. Available: http://www.teledynersi.com/products/0products_1ebw_page29.asp. [Data uzyskania dostępu: 27 Styczeń 2014].
- [8] Miyaje Alsumi, Kobayashi Hidefuni, Echigoya Hiroshi, Kubota Shiro, Wada Yuji, Ogata Yuji, Arai Hiroyuki, Ogawa Terushige. 2007. "Detonation characteristics of ammonium nitrate and activate carbon mixtures". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 20 (4-6) : 584-588.