

Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials, **2019**, 11 (2), 89 – 101; DOI: 10.22211/matwys/0176
ISSN 2083-0165

Copyright © 2019 Lukaszewicz Research Network - Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland



Article is available under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 license CC BY-NC-ND 3.0.

Research paper / Praca doświadczalna

Modyfikowanie parametrów detonacyjnych indywidualnych materiałów wybuchowych Modifying the detonation parameters of individual explosives

Andrzej Maranda^{1,*}), Dominika Górniewicz²), Józef M. Paszula²), Paweł Józwiak²)

¹⁾ Lukaszewicz Research Network – Institute of Industrial Organic Chemistry, 6 Annopol Street, 03-236 Warsaw, Poland

²⁾ Military University of Technology, 2 gen. S. Kaliskiego Street, 00-908 Warsaw, Poland

*E-mail: maranda@ipo.waw.pl

Streszczenie: Materiały wybuchowe indywidualne typu: heksogen, oktogen czy trotyl można scharakteryzować poprzez wyznaczenie ich parametrów termochemicznych i detonacyjnych. Część tych parametrów można modyfikować poprzez zmianę średnicy ładunku, rodzaju obudowy czy gęstości. Jednak o wiele większą możliwość ich zmiany można uzyskać formując mieszaniny z różnymi dodatkami. W pracy przedstawiono przegląd danych literaturowych dotyczących wpływu różnych dodatków na parametry detonacyjne i termochemiczne indywidualnych MW oraz wyniki badań wybranych parametrów detonacyjnych kompozycji heksogenu i oktogenu z mikrosferami szklanymi i mikrobalonami wytworzonymi z tworzywa sztucznego. Mierzonymi parametrami były: średnica i warstwa krytyczna oraz prędkość detonacji. Stwierdzono wzrost średnicy i warstwy krytycznej oraz spadek prędkości detonacji wraz ze wzrostem zawartości inercyjnego składnika w wybuchowej mieszaninie.

Abstract: Individual explosives such as hexogen, octogen or TNT can be characterized by determining their thermochemical and detonation parameters. Some of these parameters can be modified by changing the diameter of the charge, type of confined or density. However, a much greater possibility of their change can be obtained by forming mixtures with various additives.

The paper presents the results review of literature data regarding the impact of various additives on the detonation and thermochemical parameters of individual explosives and of research on selected detonation parameters of hexogen and octogen compositions with glass microspheres and microballoons made of plastic. Measured parameters were: critical diameter and layer as well as detonation velocity. An increase in the critical diameter and layer was observed as well as a decrease in the detonation velocity along with the increase in the content of the inertial component in the explosive mixture.

Słowa kluczowe: indywidualne materiały wybuchowe, średnica krytyczna, warstwa krytyczna, prędkość detonacji, wybuchowe łączenie

Keyword: individual explosives, critical diameter, critical layer, detonation velocity, explosive welding

Nomenklatura:

Hx	heksogen
Hx _{fl}	flegmatyzowany heksogen
MB	mikrobalony

MS	mikrosfery szklane
MW	materiał wybuchowy
TNT	trotyl

1. Wprowadzenie

Jedną ze stosowanych klasyfikacji materiałów wybuchowych (MW) jest podział na indywidualia chemiczne i mieszaniny. Zazwyczaj, zarówno w technice wojskowej jak i przemyśle wydobywczym czy w inżynierii materiałowej nie stosuje się czystych związków chemicznych o właściwościach wybuchowych. Wynika to z faktu, że w przypadku kompozycji wybuchowych można w szerokim zakresie modyfikować parametry termochemiczne i detonacyjne poprzez zmianę rodzaju i zawartości składników.

Analizując dane literaturowe można dojść do wniosku, że najczęściej stosowanym dodatkiem do materiałów wybuchowych indywidualnych jest pył aluminiowy. Wpływ jego dodatku na szereg właściwości wybuchowych kruszących MW był przedstawiony zarówno w pracach sprzed kilkadziesiąt lat np. [1] lub opublikowanych w ostatnich latach np. [2-13]. W pracy [1] były badane prędkości detonacji trotylu (TNT) i kompozycji B (Hx-TNT 60:40) w funkcji zawartości pyłu aluminiowego. Analogiczne badania zostały wykonane dla mieszanin zawierających chlorek sodu (tabela 1). Również w pracy [1] przedstawiono wyniki pomiarów i porównawczo szacowań teoretycznych prędkości detonacji mieszanin kruszących MW (TNT, Hx pentolit i kompozycja B) (tabela 2) z pyłem aluminiowym, chlorkiem i azotanem(V) sodu. Założono, że zarówno glin jak i azotan(V) sodu nie reagują w strefie reakcji chemicznej fali detonacyjnej.

Tab. 1. Prędkość detonacji mieszanin zawierających pył aluminiowy i chlorek sodu [1]

MW	Gęstość [g/cm ³]	Prędkość detonacji [m/s]
TNT	1,59	6910
TNT-NaCl 80/20	1,75	6900
TNT-Al 80/20	1,75	6800
TNT	0,85	4525
TNT-NaCl 80/20	1,00	4400
TNT-Al 80/20	1,00	3840
Hx-TNT 60/40	1,70	7800
Hx-TNT-NaCl 45/30/25	1,77	7430
Hx-TNT-Al 45/30/25	1,77	7200
Hx-TNT 60/40	1,00	5650
Hx-TNT-NaCl 45/30/25	1,15	5400
Hx-TNT-Al 45/30/25	1,15	4600

Tab. 2. Obliczone i eksperymentalne wyznaczone wartości prędkości detonacji [1]

MW	Ułamek masowy MW	Gęstość [g/cm ³]	Prędkość detonacji [m/s]	
			teoretyczna	eksperymentalna
TNT-NaCl	0,90	1,63	6770	6750
	0,70	1,71	6490	6510
	0,60	1,76	6340	6270
TNT-Al	0,80	1,69	6520	–
TNT-NaNO ₃	0,50	1,84	6180	–
RDX-NaCl	0,70	1,32	5960	5800
	0,40	1,51	4720	5000
Pentolit-NaCl	0,70	1,83	6940	6930
	0,70	1,28	5710	–
Kompozycja B-Al	0,80	1,78	7550	–

Z uzyskanych danych eksperymentalnych oraz teoretycznych jednoznacznie wynika, że zarówno dodatek pyłu aluminiowego jak i chlorku sodu powoduje spadek prędkości detonacji badanych kruszących materiałów wybuchowych. Jednocześnie można zauważyć, że jest on wyższy w przypadku pyłu aluminiowego (tabela 1). Również spadek prędkości i ciśnienia detonacji wraz ze wzrostem zawartości pyłu aluminiowego z TNT stwierdzono w pracy [10]. Wyniki oryginalnych badań przedstawiono w pracy [3], gdzie badano parametry topliwego aluminizowanego MW w funkcji zawartości wolframu. Wyniki badań ilustruje tabela 4.

Tab. 3. Wpływ dodatku pyłu aluminiowego na parametry detonacyjne TNT [10]

Zawartość składników [%]		Gęstość [g/cm ³]	Ciśnienie detonacji [GPa]	Prędkość detonacji [m/s]
TNT	Pył aluminiowy			
100	–	1,61	19,5	6960
95	5	1,63	19,0	6829
90	10	1,66	18,4	6659
85	15	1,68	17,9	6528
80	20	1,70	17,2	6325

Tab. 4. Parametry topliwego materiału wybuchowego zawierającego wolfram [3]

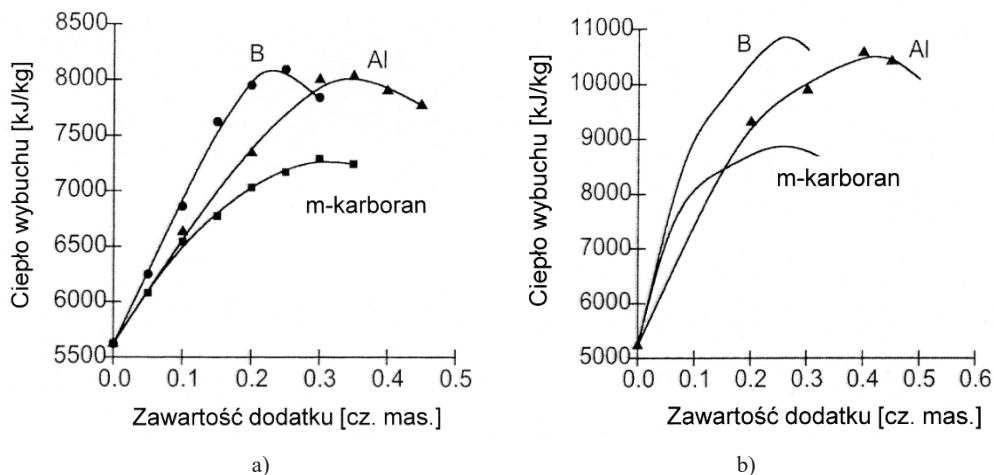
Składnik [%]				Gęstość [g/cm ³]	Prędkość detonacji [m/s]	Wrażliwość na	
RDX	TNT	Al	W			uderzenie h ₅₀ [m]	tarcie [kg]
40	30	30	–	1,83	7400	0,78	36
40	30	20	10	1,97	7320	0,82	36
40	30	10	20	2,16	7250	0,54	36

Innym pierwiastkiem, którego wpływ badano wpływ na parametry detonacyjne i termochemiczne indywidualnych materiałów wybuchowych był bor [5, 7, 8, 11, 13-20]. Między innymi interesujące wyniki pomiarów parametrów detonacyjnych MW zawierających bor uzyskano w pracy [11], w której w mieszaninach wybuchowych typu PBX częściowo zastępowano pył aluminiowy borem (tabela 5).

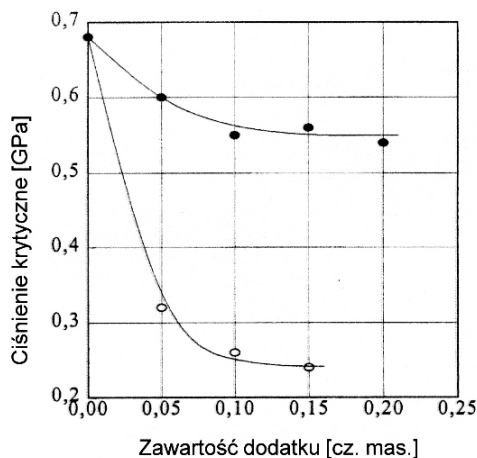
Tab. 5. Wyniki badań parametrów detonacyjnych PBX-ów zawierających pył aluminiowy i bor [11]

Składnik	Zawartość składnika [%]		
HMX (flegmatyzowany)	64	64	64
B	–	4	10
Al	20	16	10
Lepiszczce	16	16	16
Parametr			
Gęstość [g/cm ³]	1,693	1,693	1,694
Prędkość detonacji [km/s]	7,833	7,959	8,018
Ciśnienie detonacji [GPa]	24,73	25,53	25,93

Zwiększenie zawartości boru w wybuchowej mieszaninie powodowało wzrost prędkości i ciśnienia detonacji. Wyniki te świadczą o większej reaktywności boru niż pyłu aluminiowego. Badano również wpływ związków boru (*o*-karboranu i *m*-karboranu) na ciepło wybuchu indywidualnych MW. Stwierdzono wzrost ciepła wybuchu mieszanin z kruszącymi MW zarówno *o*-karboranu [11] jak i *m*-karboranu do pewnej zawartości pochodnej boru (rys. 1). Dodatek *m*-karboranu jak również ferrocenu do oktogenu powoduje gwałtowny wzrost wrażliwości na uderzenie (rys. 2). Wyższe wartości ciepła wybuchu N. Makhov uzyskał dla mieszanin z bis(trinitroetylo)nitroaminą (BTNEN) niż oktogenem, co wynika z faktu, że BTNEN ma dodatni bilans tlenowy. Mieszaniny zawierające 10-15% dodatku *m*-karboranu mają wrażliwość porównywalną z wrażliwością azydki ołowiu.



Rys. 1. Wpływ dodatków na ciepło wybuchu na jednostkę masy mieszanin z HMX (a) i BTNEN (b) [3, 20]



Rys. 2. Wpływ dodatku *m*-karboranu (○) i ferrocenu (●) na wrażliwość oktogenu na uderzenie [20, 21]

Od kilku lat trwają badania mieszanin wybuchowych zawierających wodorki metali [13, 23-27]. Dodatek wodorku magnezu do materiałów wybuchowych emulsyjnych był badany w aspekcie zastosowania jako chemicznego sensybilizatora [26, 27], a w przypadku MW indywidualnych prowadzono eksperymenty mające wyjaśnić wpływ MgH_2 na proces termicznej dekompozycji TNT [22] i Hx [23]. Natomiast mieszaniny flegmatyzowanego Hx z TiH_2 były badane pod kątem wpływu dodatki wodorku tytanu na nadciśnienie powietrznej fali podmuchowej i prędkość detonacji (tabela 6), oraz ciepło wybuchu (tabela 7).

Tab. 6. Wpływ dodatku wodorku tytanu na prędkość detonacji flegmatyzowanego heksogenu [25]

Hx flegmatyzowany	Skład wybuchowej mieszaniny [%]		Prędkość detonacji [m/s]
	Pył tytanowy o średnim rozdrobnieniu ziaren [μm]		
	6	45	
95	5	–	7769
95	–	5	7731
90	10	–	7585
90	–	10	7501
85	15	–	7323
85	–	15	7321
80	20	–	7191
80	–	20	7154

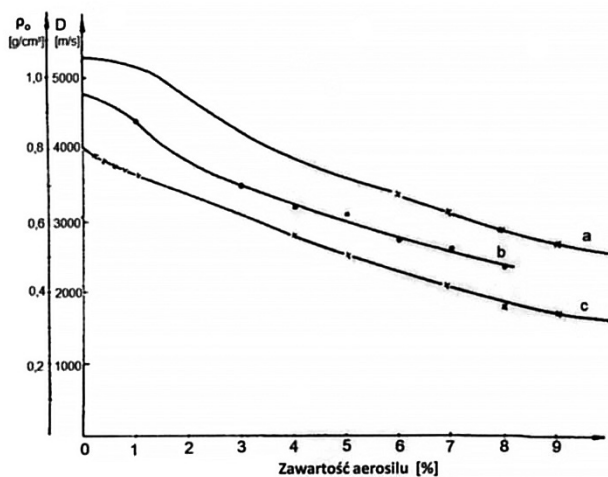
Badania ciepła detonacji mieszanin flegmatyzowanego Hx (6% wosku) z wodorkami tytanu i cyrkonu, których ziarna miały wymiar poniżej 44 μm przeprowadzono w pracy [13]. Porównawczo zmierzono ciepła detonacji MW zawierających pył aluminiowy i układ Al/ZrH₂. Rezultaty pomiarów przedstawiono w tabeli 7.

Tab. 7. Wpływ dodatku wodorków cyrkonu i tytanu na ciepło detonacji Hx_n [13]

Hx _n	Skład MW [%]			Średnia gęstość [g/cm ³]	Średnie ciepło detonacji [J/g]
	Al	ZrH ₂	TiH ₂		
100	–	–	–	1,66	4990
85	15	–	–	1,75	6100
70	30	–	–	1,86	7190
55	45	–	–	1,98	6900
85	7,5	7,5	–	1,80	5550
70	15	15	–	1,97	5800
55	22,5	22,5	–	2,17	6280
85	–	15	–	1,85	4980
70	–	30	–	2,09	4660
55	–	40	–	2,37	4560
85	–	–	15	1,79	4670
70	–	–	30	1,95	4080
55	–	–	45	2,12	3100

Z przedstawionych w tabeli 7 danych wynika, że najwyższe ciepła detonacji S. Cudziło i inni uzyskali dla MW zawierających wyłącznie pył aluminiowy. Dodatki do flegmatyzowanego heksogenu wodorków cyrkonu i tytanu powodują spadek wartości mierzonego parametru i obniżają prędkość detonacji.

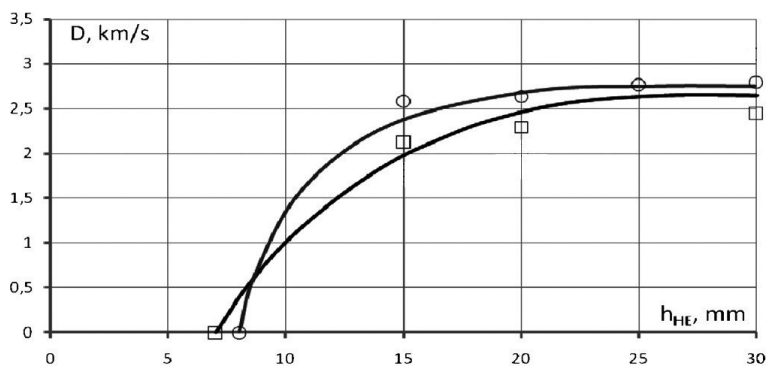
Z dotychczas zrelacjonowanych rezultatów doświadczeń, które mają głównie wartość poznawczą, można wyciągnąć generalnie wniosek, że zasadniczo we wszystkich przypadkach – wyłączając BTNEN – dodatek przebadanych substancji do indywidualnych MW powoduje spadek prędkości detonacji. Jednak jest on niewielki i aby uzyskać mieszaniny wybuchowe o jeszcze niższych parametrach detonacyjnych, które na przykład mogą być wykorzystywane w technikach wybuchowych stosowanych w inżynierii materiałowej należy do indywidualnych MW dodać innych substancji. W pracy [28] w celu zmniejszenia prędkości detonacji Hx dodawano krzemionkę o rozdrobnieniu koloidalnym (aerosil) – rys. 3.



Rys. 3. Zależność prędkości detonacji, ładunek ϕ 19 mm (a), obudowa rurka polietylenowa ϕ 5 mm (b) i gęstości (c) od zawartości aerosilu w mieszaninie z Hx_n [28]

Rezultaty badań pokazały, że oprócz obniżania parametrów detonacyjnych krystalicznych MW niewielki dodatek aerosilu znacznie poprawia sympkość mieszanin. Umożliwia to stosowanie opracowanych w pracy [28] mieszanin wybuchowych do elaboracji ładunków o małych średnicach stosowanych do wybuchowego osadzania rurek w dnach sitowych.

L.A. Andreevskikh i inni zbadali parametry detonacyjne mieszaniny wodorowęglanu sodu z pentrytem [29] i Hx [30]. W obu wariantach badano mieszaniny materiału wybuchowego z dodatkiem w stosunku 35/65. Wyniki badań zależności prędkości detonacji od grubości warstwy MW ilustruje rys. 4.



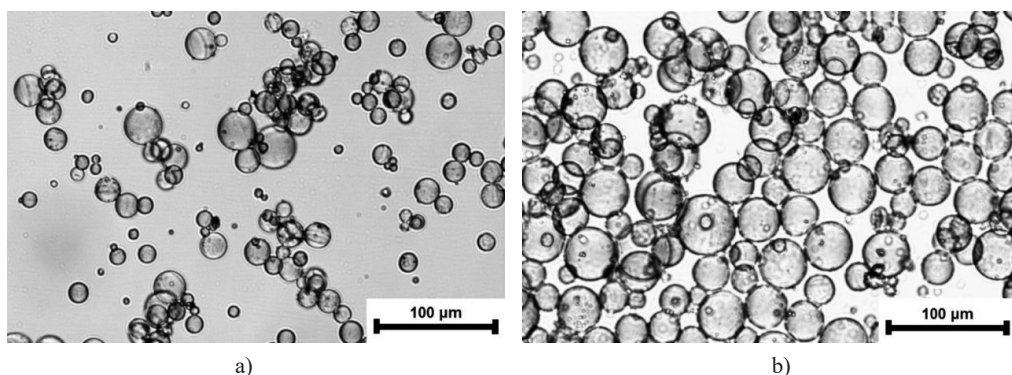
Rys. 4. Zależność prędkości detonacji od grubości warstwy (h_{HE}) dla mieszanin: \square – PETN/ $NaHCO_3$ [29], \circ – Hx/ $NaHCO_3$ [30]

Propozycja interesującego materiału wybuchowego, z punktu widzenia wybuchowego zgrzewania, została zaprezentowana w opisie patentowym [31]. Autorzy wynalazku przedstawili nietypową kompozycję wybuchową. Składała się ona bowiem z 20% bardzo drobnego pentrytu, 70% minii ołowiowej i 10% środka wiążącego zawierającego mieszaninę kauczuku butylowego i termoplastycznej żywicy terpenowej 50/50. Otrzymano kompozycję wybuchową w postaci jednorodnych i elastycznych arkuszy, które są łatwo zwijane i detonują z prędkością około 4100 m/s.

2. Część eksperymentalna

2.1. Charakterystyka składników mieszanin wybuchowych

Badane binarne układy wybuchowe składały z MW indywidualnego oraz z substancji o niskiej gęstości nasypowej. Zastosowano MW produkcji „Nitro-chem” S.A. w Bydgoszczy: oktogen flegmatyzowany kwasem stearynowym w ilości około 3,5% i Hx flegmatyzowany zawierający 3-4,5% wosku, gęstościach nasypowych 0,8-0,9 g/cm³. W celu obniżenia gęstości kompozycji użyto substancje stosowane do uczulania matrycy MW emulsyjnych [32, 33]: mikrobalony (MB) wykonane z tworzywa sztucznego i mikrosfery szklane (MS). MB o nazwie *Expancel 461DE20d70* wyprodukowane przez AkzoNobel są to małe, kuliste cząstki w formie białego proszku o rozmiarach ziaren 15-25 μm, gęstości nasypowej 70 ±6 kg/m³ (rys. 5a). Drugą wykorzystaną w badaniach substancją rozcieńczającą kruszące MW były MS o nazwie *K15* produkcji firmy 3M, wykonane ze szkła sodowo-wapniowo-borokrzemianowego o gęstości nasypowej 0,10-0,19 g/cm³ (rys. 5b).



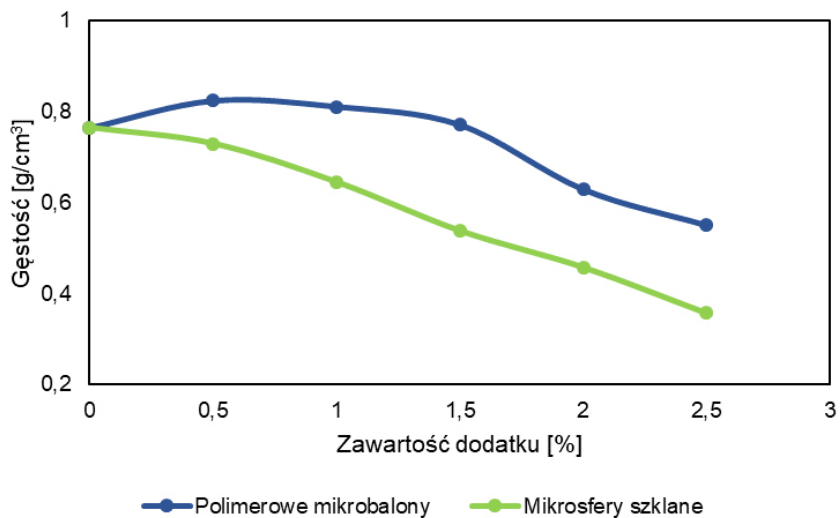
Rys. 5. Zdjęcia MB (a) i MS (b)

2.2. Przygotowanie mieszanin wybuchowych

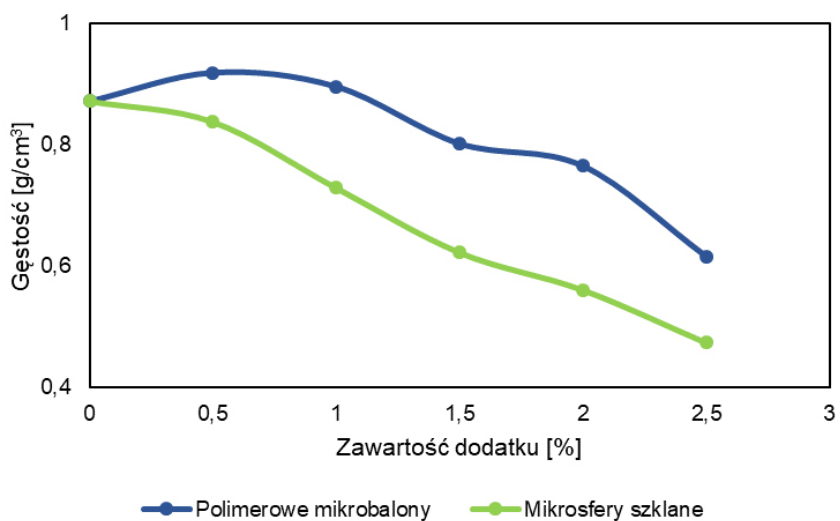
Początkowo próbki mieszanin wybuchowych próbowano przygotować poprzez wymieszanie składników. Jednak okazało się, że ze względu na bardzo duże różnice w gęstościach nasypowych pomiędzy MB i MS a Hx i oktogenem oraz kulistym kształtem inercyjnych dodatków następowała separacja składników wybuchowych mieszanin. Rozwiązaniem tego problemu okazało się dodanie 1% lepiszcza, które pozwoliło na połączenie tych substancji i uzyskanie jednorodnej mieszaniny. Każda z nich została zgranulowana z dodatkiem 10% roztworu szelaku w alkoholu etylowym. W jednym przypadku substancją wiążącą był alkohol poliwinylowy. Mieszanie trwało 4 min a kompozycje przesiewano trzykrotnie zarówno na mokro jak i po usunięciu rozpuszczalnika.

2.3. Pomiar gęstości nasypowej

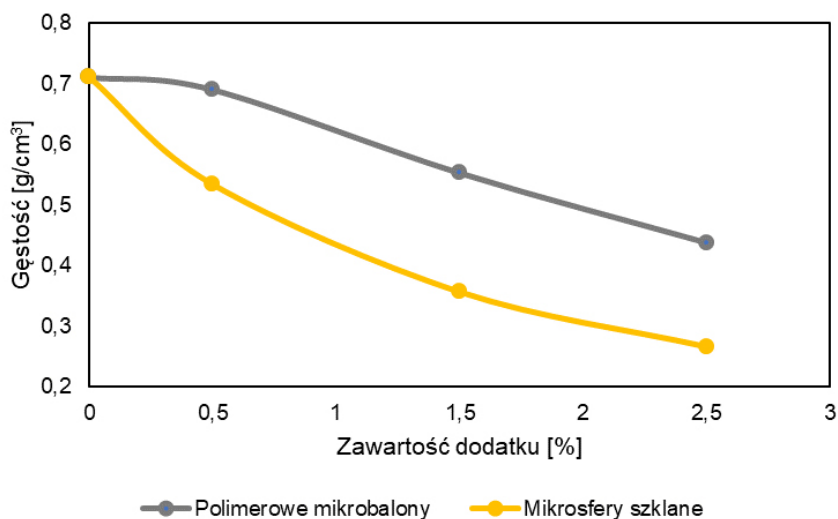
Podstawowe badania jakie przeprowadzono w ramach pracy było wyznaczenie wpływu zawartości inercyjnych składników na gęstość otrzymanych wybuchowych kompozycji. Pomiar przeprowadzono dla mieszanin zawierających lepiszcze jak i bez jego dodatku. Ze względów technologicznych zawartość substancji inercyjnych ograniczono do 2,5%. Wyniki doświadczeń, które są średnią z pięciu pomiarów, przedstawiono na rys. 6-9.



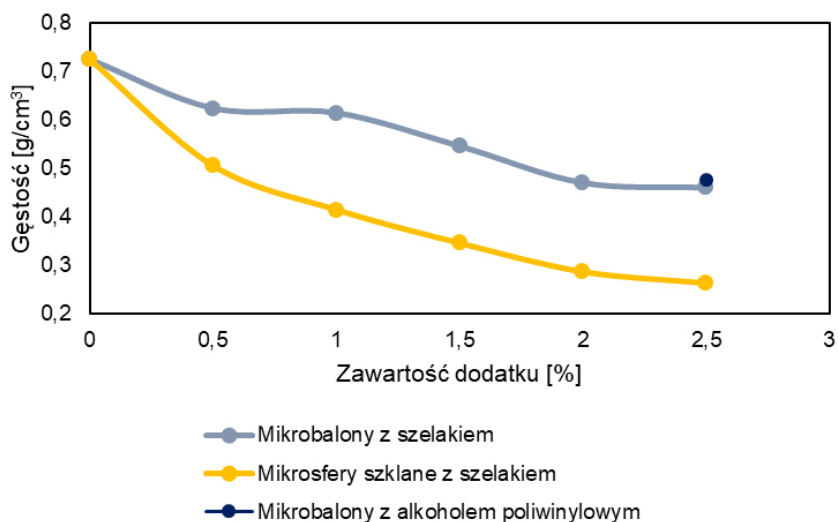
Rys. 6. Wpływ dodatków inercyjnych na gęstość flegmatyzowanego oktogenu



Rys. 7. Wpływ dodatków inercyjnych na gęstość Hx_n



Rys. 8. Wpływ dodatków inercyjnych na gęstość flegmatyzowanego oktoгену, mieszanina wybuchowa granulowana z wykorzystaniem szelaku

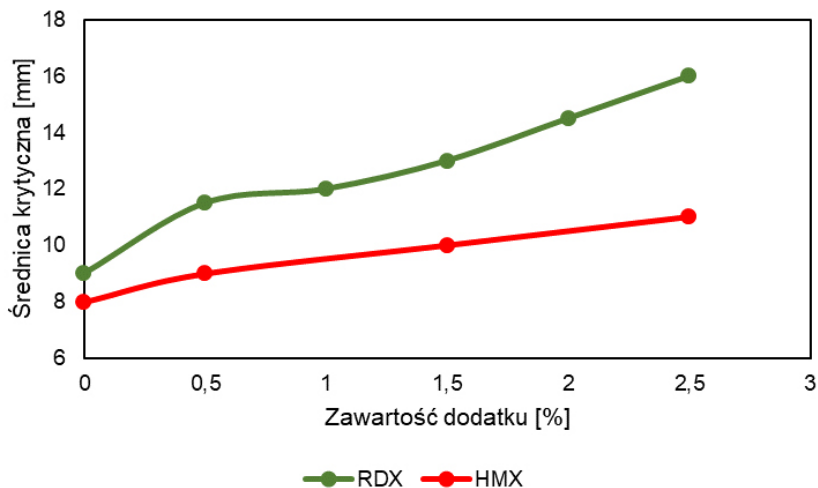


Rys. 9. Wpływ dodatków inercyjnych na gęstość H_{xfl} , mieszanina wybuchowa granulowana z wykorzystaniem lepiszcza

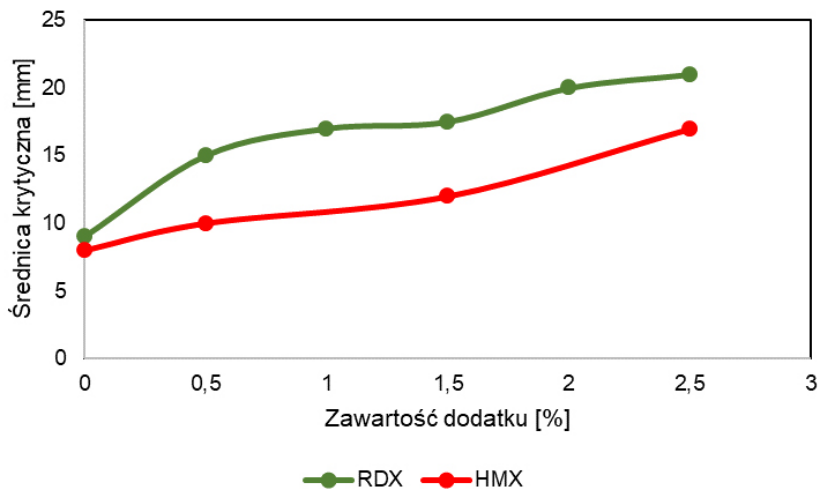
2.4. Pomiar średnicy i warstwy krytycznej detonacji

Badania średnicy krytycznej i warstwy krytycznej wykonano dla wybranych mieszanin wybuchowych. Średnicę krytyczną badano stosując papierowy stożek o kącie około 6° i długości 30 cm umieszczony na blasze stalowej. Zaznaczono na niej odcinki odpowiadające wybranym średnicom stożka, aby po detonacji ładunku można było oszacować średnicę, przy której detonacja została przerwana. Warstwę krytyczną wyznaczano z użyciem ładunku schodkowego. Wysokość środkowego schodka była równa wartości otrzymanej średnicy krytycznej, kolejne dwa schodki w górę były odpowiednio o 2 mm wyższe i dwa schodki w dół o 2 mm niższe od poprzednich. Konstrukcja wykonana z tektury miała długość 250 mm, szerokość 40 mm i była przyklejona

do płytki metalowej. Wyniki pomiarów średnicy krytycznej ilustrują rys. 10 i 11, a wartości uzyskanych warstw krytycznych zestawiono w tabelach 8 i 9.



Rys. 10. Zależność średnicy krytycznej flegmatyzowanych Hx i oktogenu od zawartości MB



Rys. 11. Zależność średnicy krytycznej Hx_n i oktogenu od zawartości MS

Tab. 8. Wartości warstw krytycznych mieszanin Hx_n z MB polimerowymi

Zawartość MB [%]	0	1,5	2,5
Warstwa krytyczna [mm]	6	12	14

Tab. 9. Wartości warstw krytycznych mieszanin Hx_n i oktogenu z MS

Zawartość MS [%]	0	0,5	1,5	2,5
MW	Warstwa krytyczna [mm]			
Hx _n	6	12	18	20
Oktogen flegmatyzowany	6	–	12	16

2.5. Pomiar prędkości detonacji

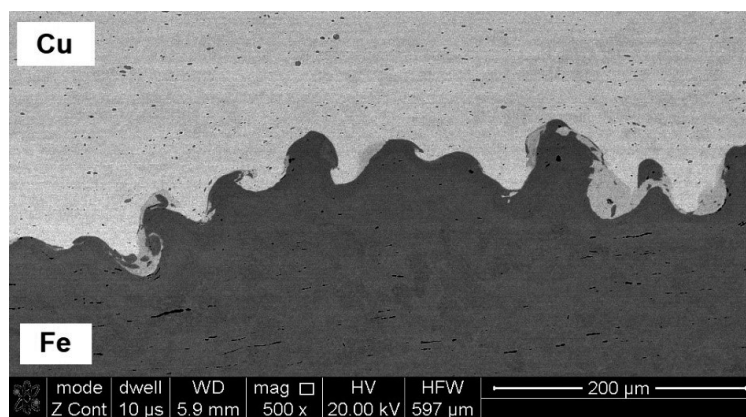
Prędkość detonacji zmierzono stosując metodę czujników zwarciovych. Trzy czujniki zwarciove były wykonane ze splecionych, odizolowanych drucików miedzianych i umieszczone w odległościach 3 cm od siebie. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 10.

Tab. 10. Wyniki pomiaru prędkości detonacji w zależności od grubości warstwy MW

Grubość warstwy MW [mm]	10	15	20
MW	Prędkość detonacji [m/s]		
Hx _{fl} (100%)	4570	4940	5110
Heksogen flegmatyzowany/MS (99,5%/0,5%)	brak detonacji	1300	1510

2.6. Wybuchowe platerowanie

W pracy przeprowadzono próby zgrzewania blach miedzi i żelaza wytypowaną mieszaniną wybuchową. Zgrzewane powierzchnie zostały wcześniej oczyszczone papierem ściernym i odtłuszczone acetonem. Płytkę stalową miała wymiary 3×45×95 mm a nastrzeliwana płytka miedziana 1×55×115 mm. Dystans między płytkami wynosił 2 mm. Do wybuchowego platerowania zastosowano mieszaninę Hx_{fl} z 5% mikrosfer szklanych. Po zgrzaniu otrzymany plater przecięto i wykonano zdjęcia utworzonego połączenia z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego (rys. 12).



Rys. 12. Zdjęcie SEM uzyskanego połączenia

3. Podsumowanie i wnioski końcowe

Prace nad modyfikacją parametrów detonacyjnych i termochemicznych indywidualnych MW są prowadzone wielopłaszczyznowo, co potwierdza przegląd prac badawczych przedstawionych we wprowadzeniu do artykułu. Ukierunkowane były na badania poznawcze, których celem jest wyjaśnienie wpływu szeregu dodatków, głównie na ciepło wybuchu czy prędkość detonacji. Wyniki tych badań mogą między innymi wyjaśnić przebieg reakcji chemicznych w fali detonacyjnej. Jednocześnie mają znaczenie użytkitarne, ponieważ stwarzają teoretyczne podstawy do opracowania szeregu nowych mieszanin wybuchowych.

Innym kryterium podziału prowadzonych badań są cele jakie chcą osiągnąć badacze. A więc uzyskać mieszaniny wybuchowe o maksymalnych parametrach, które mogłyby być zastosowane w technice wojskowej, czy też MW o obniżonych parametrach, w stosunku do wyjściowych indywidualnych MW, z potencjalnym użyciem w technikach wybuchowych wykorzystywanych w inżynierii materiałowej. Ten właśnie kierunek eksperymentów, był realizowany w ramach niniejszej pracy.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że poprzez niewielki dodatek substancji o ekstremalnie niskich gęstościach nasypowych można w bardzo szerokim stopniu obniżyć gęstości heksogenu i oktagonu (rys. 6-9). Większy spadek tego parametru uzyskano dla mieszanin zawierających mikrosfery szklane. Zmniejszenie gęstości MW powoduje obniżenie zdolności do wysokoenergetycznych przemian odwzorowanej wzrostem średnicy (rys. 10 i 11) i warstwy krytycznej detonacji (tabele 8 i 9) otrzymanych wybuchowych kompozycji i jednocześnie znaczny spadek prędkości detonacji (tabela 10). W aspekcie technik wybuchowych stosowanych w inżynierii materiałowej obniżenie zdolności do detonacji jest niekorzystnym zjawiskiem, ponieważ zawęża zakres stosowania danego MW wyłącznie do napędzanych płyt o dużych grubościach. Natomiast regulacja prędkości detonacji w granicach jej niskich wartości zwiększa możliwość wykorzystania MW do platerowania na przykład blachami ołowianymi. Dlatego należy tak manewrować ilością inertnego dodatku aby parametry materiału wybuchowego dostosować do geometrii układu wybuchowego stosowanego podczas zgrzewania oraz rodzaju metalu z jakiego jest wykonana napędzana płyta.

Charakter otrzymanych zależności średnicy i warstwy krytycznej oraz prędkości detonacji od zawartości badanych dodatków, wynika z faktu, że w objętości wybuchowej kompozycji wraz z obniżaniem gęstości znajduje się coraz mniejsza masa indywidualnego MW. Dodatkowo mikrosfery szklane odbierają częściowo ciepło produktom detonacji a mikrobalony ulegają endotermicznemu rozkładowi, co powoduje obniżenie temperatury detonacji.

Literatura

- [1] Cook M.A., Robinson D.W. 1953. *Velocity of detonation in „ideal” explosives with inert additives*. Technical Report, Contract No. N7-onr-45107, Project no. 357239, Explosives Research Group, Institute for the Study of Rate Processes, University of Utah, March 1953.
- [2] Makhov M.N. 2000. The heat of product of explosion aluminized high explosives. *Int. Ann. Conf. ICT: Energetic Materials. Analysis, Diagnostics and Testing, Proc. 31th*, Karlsruhe, 42-1-42-11.
- [3] Mishra V.S., Bhagat A.L., Vadali S.R., Singh V.K., Wasnik R.D., Asthana S. 2012. Effect of tungsten on aluminized melt cast high explosive formulation. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 9 (2): 131-138.
- [4] Hou C., Geng X., An Ch., Wang J. 2013. Properties of Al nanoparticles and their influence on thermal decomposition of RDX. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 10 (1): 123-133.
- [5] Makhov M.N. 2015. Effect of aluminum and boron additives on the heat explosion and acceleration ability of high explosives. *Russ. J. Phys. Chem. B.* 9 (1): 50-55.
- [6] Zhou Z.Q., Nie J.X., Zeng L., Jin Z.X., Jiao Q.J. 2016. Effects of aluminum content on TNT detonation and aluminum combustion using electrical conductivity measurements. *Propellants Explos. Pyrotech.* 41 (12): 84-91.
- [7] Chen Y., Xu S., Wu D.J., Liu D.B. 2016. Experimental study of the explosion of aluminized explosives in air. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 13 (1): 117-134.
- [9] Xu S., Chen Yu., Chen X., Wu D., Liu D. 2016. Combustion heat of the Al/B powder and its application in metallized explosives in underwater explosions. *Combust. Explos. Shock Waves* 52 (3): 97-104.
- [10] Zhou Z., Chen J., Yuan H., Nie J. 2017. Effects of aluminum size on the detonation pressure of TNT/Al. *Propellants Explos. Pyrotech.* 42 (12): 1401-1409.
- [11] Gao, D-Y., Song Q-G., Zhang Ch-Y., Zhao F., Li X., Zheng B-H., Cao W., Guo X. 2018. Study on sensitivity and detonation property of explosive containing B/Al. *Seminar New Trends in Research of Energetic Materials, Proc., 21st*, Pardubice, 126-133.
- [12] Xiang D., Rong J., He X., Feng Z. 2017. Underwater explosion performance of RDX/AP-based aluminized explosives. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 14 (1): 60-76.
- [13] Cudziło S., Trzeciński W.A., Paszula J., Szala M., Chyłek Z. 2018. Effect of titanium and zirconium hydrides on the heat detonation of RDX-based explosives – a comparison to aluminium. *Propellants Explos. Pyrotech.* 43 (3): 280-285.
- [14] Pepekina V.I., Makhov M.N., Apin A.Ya. 1972. Reakcii bora pri vzryve. *Fiz. Goreniya Vzryva* 8 (1): 135-138.

- [15] Akimova L.N., Apin A.Ya., Stesik L.N. 1972. Detonatsiya VV c borom i evo organicheskimi proizvodnymi. *Fiz. Goreniya Vzryva* 8 (4): 475-479.
- [16] Makhov M. 2004. Explosion heat of boron-containing explosive compositions. *Int. Ann. Conf. ICT: Energetic Materials. Structure and Properties, Proc.*, 35th, Karlsruhe, 55-1-55-10.
- [17] Sezaki T., Date S., Satoh J. 2004. Study on the effects of addition of boron particles to RDX-based PBV regarding prevention of Neumann effect. *Mater. Sci. Forum* 465-466: 195-200.
- [18] Kanel G.I., Utkin A.V., Razorenov S.V. 2009. Rate of the energy release in high explosives containing nano-size boron particles. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 6 (1): 15-30.
- [19] Xu Y., Cu Q-Z., Yu S. 2018. Effect of boron coated with LiF on the underwater explosion performance of RDX based explosives, *Proc. 21st Seminar New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, April 18-20, 2018*: 352-356.
- [20] Magnuszewska P., Grądział M., Maranda A., Florczak B. 2019. Zastosowanie boru w materiałach wybuchowych. Cz. I. Materiały wybuchowe indywidualne i mieszaniny z MW kruszącymi. *Przem. Chem.* 98 (8): 1213-1223.
- [21] Teselkin V.A., Makhov M.N. 2001. Impact sensitivity and explosion heat of HMX/meta-carborane compositions. *Int. Ann. Conf. ICT: Energetic Materials. Ignition, Combustion and Detonation, Proc.*, 32nd, Karlsruhe, 76-1-76-8.
- [22] Yao M., Chen L., Peng J. 2015. Effects of MgH₂/Mg(BH₄)₂ powders on the thermal decompositions behaviors of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT). *Propellants Explos. Pyrotech.* 40 (2): 197-202.
- [23] Yao M., Chen L., Rao G., Zou J., Zeng X., Peng J. 2013. Effect of nano-magnesium hydride on thermal decomposition behaviors RDX. *J. Nanomaterials*. Article ID 864895.
- [24] Xue B., Ma H.-H., Shen Z.-W. 2015. Air explosion characteristic of a novel TiH₂/RDX composite explosive. *Combust. Explos. Shock Waves*. 51 (4): 488-494.
- [25] Xue B., Ma H., Shen Z., Ren L., Lin M. 2017. Effect of TiH₂ particle size and content on the underwater explosion performance of RDX-based explosives. *Propellants Explos. Pyrotech.* 42 (7): 791-798.
- [26] Cheng Ya.F., Ma H.H., Shen Zh.W. 2013. Detonation characteristics of emulsion explosives sensitized by MgH₂. *Combust. Explos. Shock Waves*. 49 (5): 614-619.
- [27] Maranda A., Sitkiewicz-Wołodko R., Bajdor K., Florczak B. 2017. *Przem. Chem.* 96 (8): 1213-1223.
- [28] Maranda A., Nowaczewski J., Zygmunt B. 1976. Krystaliczny materiał wybuchowy – heksosil. *Biuletyn WAT* 25 (8): 119-121.
- [29] Andreevskikh L.A., Dendenkov Y.P., Drennov O.B., Mikhailov A.L., Titova N.N., Deribas A.A. 2011. Explosive mixtures for explosive welding of thin foils. *Propellants Explos. Pyrotech.* 36 (1): 48-50.
- [30] Andreevskikh L.A., Dendenkov Y.P., Drennov O.B., Mikhailov A.L., Titova N.N., Deribas A.A. 2011. Explosive mixtures for explosive welding of thin foils: Part 2. RDX-baking soda mixtures. *Propellants Explos. Pyrotech.* 36 (5): 430-432.
- [31] Cowan G.R., Douglass J.J., Holtzman A.H. 1964. *Explosive bonding*. Patent US 3137937.
- [32] Maranda A., Gołąbek B., Kasperski J. 2008. *Materiały wybuchowe emulsyjne*. Warszawa: Wyd. Naukowo-techniczne.
- [33] Maranda A. 2010. *Przemysłowe materiały wybuchowe*. Warszawa: Wyd. Wojskowej Akademii Technicznej.

– Received: September 20, 2019

– Revised: November 18, 2019

– Published first time online: December 30, 2019