

*Józef Paszula**, *Andrzej Maranda**, *Barbara Gołąbek***, *Johann Kasperski***

ZDOLNOŚĆ DO WYKONANIA PRACY GÓRNICZYCH MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH W TEŚCIE WYBUCHU PODWODNEGO ***

1. Wstęp

Istotą zjawiska wybuchu czy detonacji jest szybka reakcja chemiczna, w wyniku której z substancji wyjściowej materiału wybuchowego powstają gazowe produkty charakteryzujące się wysoką temperaturą i ciśnieniem.

W wyniku detonacji materiału wybuchowego następuje oddziaływanie pomiędzy gazowymi produktami wybuchu a środowiskiem otaczającym miejsce wysokoenergetycznych procesów. Produkty wybuchu wykonują w stosunku do otoczenia pracę mechaniczną, co określane jest jako **zdolność materiału wybuchowego do wykonania pracy**. Następuje również niszczenie i deformacja środowiska nazywane **kruszością materiału wybuchowego**. Parametry te można wyznaczyć na drodze teoretycznej lub doświadczalnej. W przypadku materiałów wybuchowych emulsyjnych stosowano bardzo zróżnicowane metody wyznaczania zdolności do wykonania pracy i kruszości. Parametry te mają decydujące znaczenie przy charakteryzowaniu materiałów wybuchowych i pozwalają dobrać odpowiedni typ materiału oraz jego ilość do odpowiedniego przygotowania prac strzałowych. W przypadku nieidealnych materiałów wybuchowych klasyczne metody określania zdolności do wykonania pracy nie dają wiarygodnych wyników ze względu na małą masę używanych w próbach ładunków badanych materiałów wybuchowych nieidealnych. Dlatego też dąży się do wykorzystania w tym celu wyników testu wybuchu podwodnego.

2. Kruszość i zdolność do wykonywania pracy

W pracy [1] kruszość MWE była wyznaczana klasyczną metodą Hessa. Badano ładunki materiałów wybuchowych emulsyjnych typoszeregu EL o masie 50 g pobudzane spłon-

* Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

** Błastexpol, Duninów

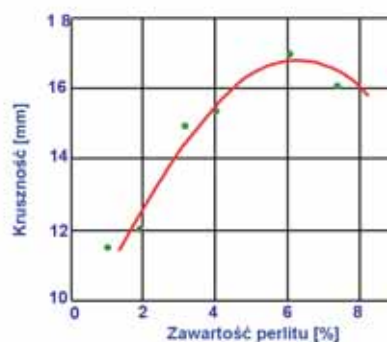
*** Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego nr 5 T12A 033 23 finansowanego przez KBN

ką nr 8 — nie podano gęstości ładunków (tab. 1). Przeprowadzono również próby z ładunkami MWE o różnej zawartości perlitu, a więc zróżnicowanej gęstości (rys. 1).

TABELA 1

Kruszność MWE wyznaczona metodą Hessa [1]

Nazwa MWE	Kruszność, mm
EL-101	17,30; 18,25; 18,38; 19,12; 19,40
EL-102	18,54; 19,22; 19,43; 20,28
EL-103	18,99; 18,92; 19,82; 18,85
EL-104	18,69; 19,39; 19,61; 20,07
EL-105	16,70; 17,19; 17,97; 17,77



Rys. 1. Zależność kruszności MWE od zawartości perlitu [1]

W pracach [2, 3] badano natomiast kruszność MWE metodą fragmentacji stalowych bloków (tab. 2). Badania MWE prowadzono porównawczo dla pentrytu (PETN), żelatyny wybuchowej (SG80) i węglowego zawiesinowego materiału wybuchowego (WGL1) [2] oraz pentrytu, dynamitu i MWZ [3]. W eksperymentach stosowano próbki pentrytu o masie 30 g i przemysłowych materiałów wybuchowych o masie 35 g.

TABELA 2

Parametry stalowych bloków stosowanych do wyznaczania kruszności MW

Literatura	Wymiary bloku, mm				Masa bloku, kg
	Średnica	Wysokość	Średnica otworu	Długość otworu	
[2]	160	160	27	110	23,5 ± 0,235
[3]	164	160	27	110	24,0 ± 0,240

W pracy [2] po wybuchu analizowano wymiary i masy odzyskanych największych fragmentów bloku, wyznaczając największy wymiar (X_m), całkowitą masę (W_i), średnią masę fragmentu (W_i/N) i średni rozmiar fragmentu (X_{50}) wyznaczony metodą Rosina-Rammlera. Wyniki obliczeń parametrów termodynamicznych (D — prędkość detonacji, p — ciśnienie wybuchu, T — temperatura wybuchu, V_o — objętość produktów wybuchu) z wykorzystaniem programu TIGER. Rezultaty eksperymentów ilustruje tabela 3.

TABELA 3

Wyniki pomiaru kruszości metodą fragmentacji bloku stalowego [2]

MW	PETN	EML1 – 30% PETN	EML2 – 15% PETN	SG80	EML3-Al	EML4- -bez Al	WGL1
ρ_o , g/cm ³	1,15	1,35	1,25	1,20	1,10	1,10	1,15
D , m/s	6250	6512	6004	–	5267	5247	5506
p , kbar	121,3	133,9	106,8	–	74,9	71,9	85,3
T , K	4674	3073	2807	–	2540	2334	2851
V_o , dm ³ /kg	764	833	858	–	871	917	858
D_m , cm	6,48	6,74	8,22	8,28	9,12	9,42	10,05
W_i , kg	16,38	18,81	21,37	22,06	22,75	23,05	23,41
W_i/N , kg	1,23	1,61	2,29	3,08	3,85	3,89	16,15
X_{50} , kg	4,7	5,1	5,5	6,1	6,1	6,2	7,7

Natomiast A.G. Mardtho Jr. i D. Bastos-Netto [3] zastosowali do analizy wielkości fragmentów bloku między innymi modele Rosina–Rammlera–Benneta i Gatesa–Gaudina–Schumanna. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Wyniki pomiaru kruszości metodą fragmentacji bloku stalowego [3]

MW	PETN	Dynamit	MWZ	MWE
ρ_o , g/cm ³	0,975	1,44	1,10	1,20
D , m/s	5430	2559	3710	4440
X_m , cm	6,8 ± 0,2	9,5 ± 0,3	9,1 ± 0,3	8,0 ± 0,3
X_{50} , cm	4,6 ± 0,1	7,9 ± 0,4	7,1 ± 0,4	5,9 ± 0,4

W podsumowaniu pracy jej autorzy podkreślają, że pomimo uzyskania w bloku Trauzla zbliżonego wyniku (~ 300 cm³) dla wszystkich przemysłowych testowanych MW metoda fragmentacji bloku stalowego daje bardzo zróżnicowane wyniki eksperymentów.

Kolejną metodą określania efektywności oddziaływania na otoczenie produktów wybuchu generowanych podczas detonacji MWE był Plate Dent Test [4, 5]. W pracy [5] w przypadku ładunków o średnicach 25 mm i masie około 130 g stosowano płyty aluminiowe. Natomiast ładunki o średnicy 83 mm i masie około 2,0 kg detonowano na płytach wykonanych z miękkiej stali. Badania prowadzono dla MWE zawierających różne zawartości wody i uczulanych szklanymi mikrosferami (SMS) lub perlitem (PER). Wyniki eksperymentów i porównawczo parametry detonacyjne oszacowane z zastosowaniem programu TIGER przedstawiono w tabelach 5 i 6.

TABELA 5

Parametry detonacyjne i wyniki Plate Dent Test uzyskane z zastosowaniem płyty aluminiowej [5]

MW	ρ_{o_0} , g/cm ³	D , m/s	Q_{det} , kcal/kg	p , kbar	Wgl_{obj} , cm ³
PETN	0,90	5896	1416	71,5	6,8
MWE-10 H ₂ O/3 SMS	1,08	4635	697	23,2	4,1
MWE-15 H ₂ O/3 SMS	1,03	4855	625	24,3	3,3
MWE-20 H ₂ O/3 SMS	1,08	4344	553	20,4	2,8
MWE-10 H ₂ O/4 PER	1,10	3250	690	11,6	3,0
MWE-15 H ₂ O/4 PER	1,12	3420	620	13,1	2,4

Q_{det} — ciepło detonacji, Wgl_{obj} — objętość wgłębienia

W pracy [5] wykonano również Plate Dent Test dla MWE uczulanych mikrosferami szklanymi, perlitem i chemicznie (GS) i zawierających zróżnicowane zawartości wody (tab. 6).

TABELA 6

Wpływ wody i sposobu uczulania na wyniki Plate Dent Test MWE uzyskane z zastosowaniem płyty z miękkiej stali [5]

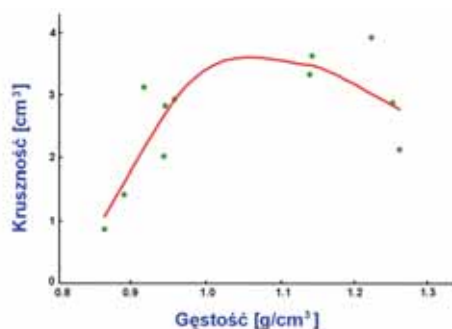
Metoda sensybilizacji	Zawartość wody, %							
	17		24		27		33	
	Wgl_{gl} , cm	Wgl_{obj} , cm ³	Wgl_{gl} , cm	Wgl_{obj} , cm ³	Wgl_{gl} , cm	Wgl_{obj} , cm ³	Wgl_{gl} , cm	Wgl_{obj} , cm ³
SMS	2,10	69	0,91	36	0,87	28	0,76	16
GS	2,11	57	0,96	28	0,90	21	0,78	14
PER	1,97	56	0,65	22	0,47	10	b.det.	b.det.

Wgl_{gl} — głębokość wgłębienia, Wgl_{obj} — objętość wgłębienia, b.det. — brak detonacji

Na podstawie otrzymanych wyników Plate Dent Test autorzy pracy [5] wyciągają dwa podstawowe wnioski: ze wzrostem zawartości wody spada kruszność MWE, a efektywność uczulania MWE jest następująca:

szklane mikrosfery > chemiczne nagazowanie > perlit.

Natomiast w pracy [4] określono zależność pomiędzy wynikami Plate Dent Test i gęstością MWE i stwierdzono występowanie maksymalnej wielkości kruszności przy gęstości około $1,05 \text{ g/cm}^3$ (rys. 2).



Rys. 2. Zależność kruszności (Plate Dent Test) od gęstości MWE [4]

Tradycyjne metody określania zdolności do wykonania pracy (wahadło balistyczne, blok Trauzla) mają jedną zasadniczą wadę, jaką jest stosowanie w testach niewielkich ilości materiału wybuchowego. Jest to szczególnie niekorzystne w przypadku górniczych materiałów wybuchowych, w których pełne rozwinięcie wysokoenergetycznych reakcji w tak małej objętości jest niemożliwe. Dlatego od kilkudziesięciu lat w niektórych ośrodkach naukowych do określania zdolności do wykonania pracy stosowana jest metoda testu podwodnego, w której jednorazowo używa się do 8 kg badanego materiału wybuchowego. Również tą metodą były badane materiały wybuchowe emulsyjne [6–9].

Ziru Guo, Zhaowu Shen, Gambin Yao i Shaouxiang Lu w pracy [8] badali metodą testu podwodnego cztery rodzaje MWE (tab. 7) z dodatkami różnych ilości pyłu aluminiowego oraz porównawczo górniczy materiał wybuchowy nr 2 o składzie: azotan(V) amonu — 85,0%, trotyl — 11,0% i mączka drzewna — 4,0%. W odróżnieniu od innych eksperymentatorów w badaniach stosowali bardzo małe ilości (10 g) testowanych materiałów wybuchowych. Próby prowadzili w zbiorniku o średnicy 5,5 m i głębokości 3,62 m. Ładunek materiału wybuchowego był umieszczany w aluminiowej obudowie na głębokości 2,4 m i inicjowany zapalnikiem nr 8. Czujnik ciśnienia umieszczono w odległości 1 m od ładunku MW. Mierzono także prędkość detonacji MW. Wyniki badań zestawiono w tabeli 8.

We wszystkich badanych materiałach wybuchowych emulsyjnych następował wzrost prędkości detonacji po dodaniu 2% pyłu aluminiowego, a następnie jej spadek przy większych ilościach metalicznego komponentu. Natomiast wraz ze wzrostem zawartości pyłu aluminiowego zawsze zwiększała się energia fali uderzeniowej (której przyrost był szczególnie wysoki), energia pęcherza powietrznego i energia całkowita.

TABELA 7

Składy testowanych emulsyjnych materiałów wybuchowych [8]

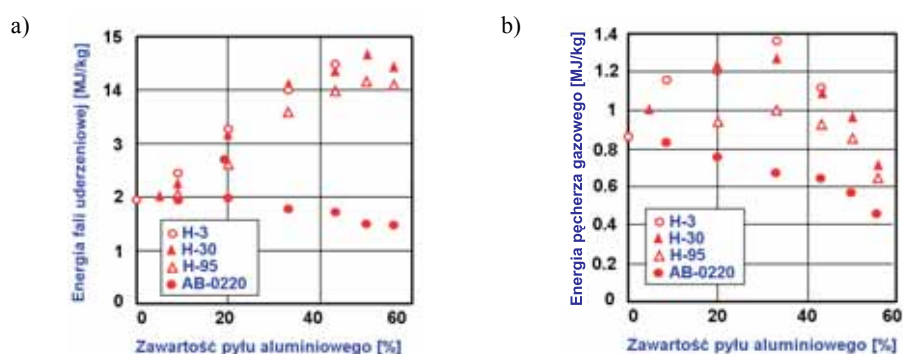
Nr MWE	Składnik, %						
	Azotan(V) amonu	Azotan(V) sodu	Mocznik	Woda	Wosk	Emulgator	Szklane mikrosfery
1	69,5	12,0	1,0	10,0	3,5	2,0	2,0
2	68,9	12,0	1,1	10,0	4,0	2,0	2,0
3	67,3	12,0	2,7	10,0	4,0	2,0	2,0
4	67,2	12,0	2,3	10,0	4,5	2,0	2,0

TABELA 8

Wpływ dodatku pyłu aluminiowego na prędkość detonacji oraz energie fali uderzeniowej, pęcherza gazowego i całkowitą [8]

Zawartość pyłu aluminiowego, %		0	2	6	10	14
MWE-1	Prędkość detonacji	4621	4722	4613	4501	4405
	Energia:					
	— fali uderzeniowej	0,281	0,423	0,520	0,665	0,872
	— pęcherza gazu	2,062	2,205	2,337	2,379	2,453
	— całkowita	2,508	2,885	3,164	3,424	3,818
MWE-2	Prędkość detonacji	4721	4803	4713	4,579	4497
	Energia:					
	— fali uderzeniowej	0,366	0,371	0,424	0,634	0,896
	— pęcherza gazu	2,126	2,267	2,370	2,437	2,472
	— całkowita	2,709	2,886	3,049	3,444	3,879
MWE-3	Prędkość detonacji	4608	4753	4596	4500	4382
	Energia:					
	— fali uderzeniowej	0,305	0,315	0,390	0,611	0,877
	— pęcherza gazu	2,009	2,158	2,293	2,372	2,439
	— całkowita	2,488	2,665	2,913	3,342	3,777
MWE-4	Prędkość detonacji	4587	4677	4570	4464	4292
	Energia:					
	— fali uderzeniowej	0,291	0,263	0,404	0,653	0,883
	— pęcherza gazu	1,978	2,147	2,269	2,362	2,436
	— całkowita	2,435	2,556	2,910	3,386	3,779
MW nr 2 — prędkość detonacji: 3200 m/s; energia fali uderzeniowej: 0,742 MJ/kg; energia pęcherza gazu: 2,469 MJ/kg; energia całkowita: 3,440 MJ/kg						

Y. Kato, K. Takahashi, A. Tori, K. Kurokawa i K. Hattori [6] zastosowali metodę testu podwodnego do badania MWE o składzie matrycy: azotan(V) amonu 74,6%, azotan(V) hydrazyny 10,6%, woda 10,6%, monooleinian sorbitanu 2,1% i mikrokrystaliczny wosk 2,1%, uczulanych 1,04% mikrobalonów polistyrenowych o gęstości początkowej $1,10 \text{ g/cm}^3$, zawierających różne ilości czterech odmian pyłu aluminiowego. Zawartość pyłu aluminiowego dochodziła do 55%. Badania prowadzono w zbiorniku wodnym o głębokości 8 m. Ładunki o średnicy 50 mm i masie 0,25 kg były umieszczane na głębokości 4 m, w odległości 3 m od czujnika. Próbkę detonowano zapalnikiem elektrycznym nr 6. Wyniki eksperymentów przedstawiono na rysunku 3a i 3b.



Rys. 3. Wpływ zawartości i rozmiaru ziaren pyłu aluminiowego na energię fali uderzeniowej (a) i pęcherza gazowego (b), pyły aluminiowe o średnim rozdrobnieniu, μm :
H-3 — 5, H-30 — 30, H-95 — 70, i AB-0220 — 450 [6]

Na podstawie uzyskanych różnic w energiach fali uderzeniowej i pęcherza gazowego, autorzy pracy [6] wyciągają wniosek o mechanizmie chemicznych reakcji glinu. Uważają, że cząstki pyłu aluminiowego palą się w fazie skondensowanej w wyniku reakcji z wodą, ditlenkiem węgla i azotem, które dyfundują do ich metalicznej powierzchni.

Y. Kato, A. Torri, T. Ishida i K. Hattori [9], stosując identyczny układ pomiarowy do testu podwodnego jak w pracy [6], badali sześć odmian MWE różniących się zawartością i rozmiarem mikrobalonów wykonanych z tworzyw sztucznych. Wszystkie mieszaniny wybuchowe miały gęstość początkową $1,10 \text{ g/cm}^3$. Równolegle określali zdolność do wykonania pracy metodą wahadła balistycznego. Porównując rezultaty eksperymentów, stwierdzili występowanie korelacji pomiędzy wynikami uzyskanymi na wahadle balistycznym a energiami fali uderzeniowej i pęcherza gazowego.

3. Badane materiały wybuchowe

Do badań wytypowano dwa materiały wybuchowe emulsyjne należące do kompozycji LWC (Low Water Composition) oraz TNT.

W tabeli 9 przedstawiono podstawowe parametry i skład badanych materiałów wybuchowych. Przygotowane ładunki emulgatów o masie około 1 kg oraz TNT o masie 0,5 kg umieszczano w układzie pomiarowym. Ładunki materiałów wybuchowych pobudzano za pomocą zapalników. Emulsyjnych materiałów wybuchowych używano w postaci gotowych wyrobów komercyjnych o średnicy 80 mm, natomiast ładunek TNT składał się z kilku prasowanych kostek trotylu o średnicy 50 mm.

TABELA 9

Skład i parametry energetyczne badanych materiałów wybuchowych

Parametr MW		Nazwa materiału wybuchowego		
		MWE		TNT
		ALAN 1	ALAN 3	
Skład, cg/g	Azotany	84,26	84,48	–
	Glin	2,07	5,00	–
	Woda	4,02	3,27	–
	Inne	9,65	7,25	–
Gęstość MW, kg/m ³		1170	1150	1580 ± 5
Zdolność do wykonania pracy, cm ³		–	310	300
Ciepło wybuchu, kJ/kg		3640,60	4307,29	4533
Idealna praca wybuchu, kJ/kg		3046,38	3581,13	4500

4. Pomiar nadciśnienia fali uderzeniowej generowanej wybuchem MW

Pomiary nadciśnienia fali uderzeniowej i czasu pulsacji pęcherza gazowego produktów wybuchu realizowano za pomocą czujników ciśnienia PCB Piezotronics Inc. serii 138A. Czujniki te dzięki swojej konstrukcji pozwalają rejestrować nadciśnienie fali uderzeniowej przechodzącej. Czujniki ciśnienia tej firmy są czujnikami elektromechanicznymi przetwarzającymi ciśnienie (stosunek działającej siły do powierzchni elementu czynnego czujnika) na proporcjonalny sygnał napięciowy. Wyjściowy sygnał napięciowy uzyskiwany jest dzięki wykorzystaniu efektu piezoelektrycznego. W tabeli 10 przedstawiono dane techniczne czujnika ciśnienia wykorzystywanego w pomiarach ciśnienia fal uderzeniowych.

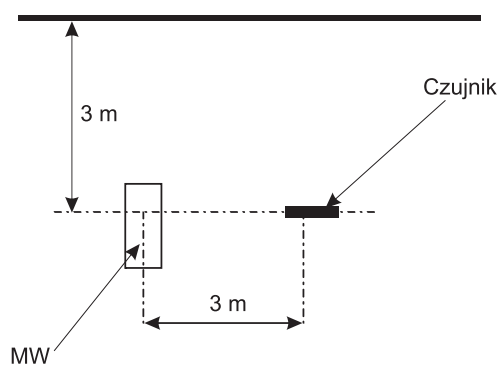
Czujniki mocowane były w układzie zapewniającym kontrolę głębokości zanurzenia oraz odległości od ładunku materiału wybuchowego. Schemat układu przedstawiono na rysunku 4. W układzie stosowano dwa czujniki umieszczone w wierzchołkach trójkąta równoramiennego w określonej odległości od ładunku. Kable pomiarowe oraz połączenie kabli

z czujnikiem umieszczano w wężyku PE, co zapewniało szczelność i wystarczającą dla pomiarów wytrzymałość linii pomiarowych oraz jej wyporność — dzięki temu kable linii pomiarowych nie tonęły na dnie zbiornika. Sygnał z linii pomiarowych przekazywany był przez układ wzmacniający do oscyloskopu, zapewniającego wystarczającą rozdzielczość, aby zarejestrować zarówno przebieg ciśnienia fali uderzeniowej, jak i pulsacji pęcherza gazowego. Zarejestrowany na oscyloskopie przebieg ciśnienia transmitowano do komputera, bezpośrednio do arkusza kalkulacyjnego, gdzie otrzymany sygnał poddawano obróbce i przeprowadzano obliczenia.

TABELA 10

Parametry techniczne czujnika PCB wykorzystywanego w pomiarach

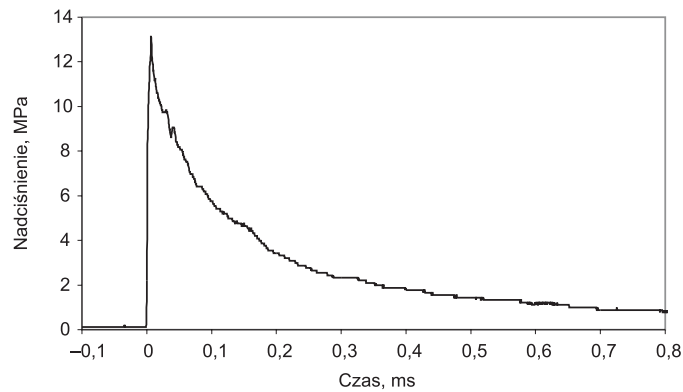
Parametr	Czujnik 138A05	Czujnik 138A10
Zakres pomiarowy, MPa	34,50	69,00
Rozdzielczość, kPa	0,69	1,37
Czułość, mV/kPa	0,15	0,073
Częstotliwość rezonansowa, MHz	≥ 1	≥ 1
Element czuły, materiał	turmalin	turmalin



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego

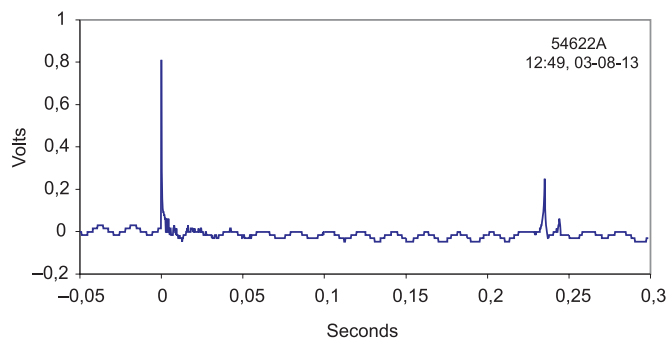
5. Wyniki pomiarów i dyskusja

Na rysunku 5 przedstawiono przykładową rejestrację nadciśnienia fali uderzeniowej generowanej wybuchem ładunku badanego materiału wybuchowego. Na podstawie otrzymanego przebiegu nadciśnienia określano nadciśnienie maksymalne oraz energię fali uderzeniowej.



Rys. 5. Przebieg naciśnienia dla ładunku ALAN 1

Czas określony na podstawie diagramu przedstawionego na rysunku 6 pomiędzy czasem zarejestrowania pierwotnej fali uderzeniowej a pierwszą pulsacją pęcherza gazowego stanowił podstawę określenia energii pęcherza gazowego.



Rys. 6. Rejestracja czasu pulsacji pęcherza gazowego

W tabeli 11 przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń uzyskane dla badanych materiałów wybuchowych.

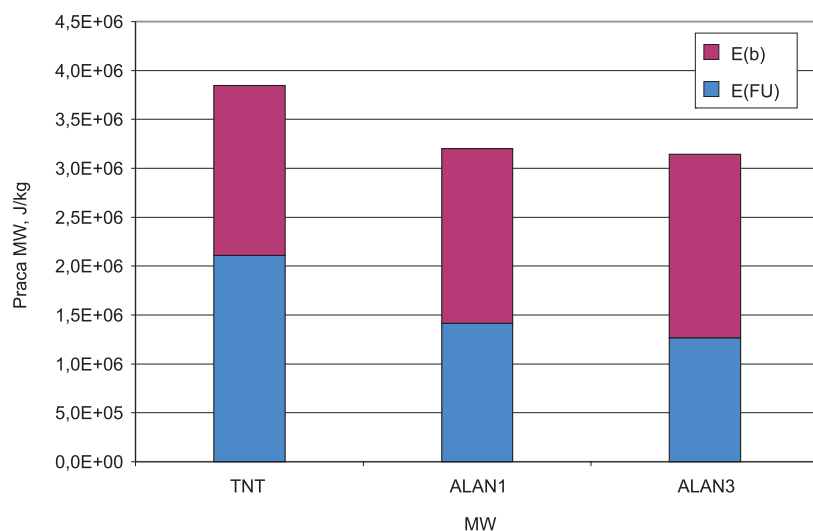
TABELA 11

Wyniki pomiarów naciśnienia i obliczeń pracy MW

MW	Δp_{\max} , MPa	E_{FU} , MJ/kg	E_b , MJ/kg	A_0 , MJ/kg
TNT	$12,13 \pm 0,77$	$2,11 \pm 0,11$	1,73	3,84
ALAN 1	$13,19 \pm 0,67$	$1,42 \pm 0,07$	1,78	3,20
ALAN 3	$13,14 \pm 0,82$	$1,27 \pm 0,07$	1,87	3,14

E_b — energia pęcherza gazowego, A_0 — suma energii fali uderzeniowej i pęcherza gazowego

Zwraca uwagę fakt, że nadciśnienie uzyskane dla materiałów wybuchowych emulsyjnych (ALAN 1 i 2) przewyższa to uzyskane dla TNT. Jednakże masa ładunku TNT była o połowę mniejsza. Na kolejnym wykresie, przedstawionym na rysunku 7, zaprezentowane zostały wyniki obliczeń pracy ekspansji materiałów wybuchowych. Praca ta jest często traktowana jako miara zdolności do wykonania pracy materiałów wybuchowych. Przy ilości stosowanego w teście materiału wybuchowego (1 kg dla emulgitów i 0,5 kg dla TNT) w trakcie wybuchu uwalnia się prawie całkowita energia zgromadzona w materiale wybuchowym. Ze względu na gęstość wody i jej właściwości energia ta będzie bliska energii uwalnianej w trakcie urabiania górotworu za pomocą tych materiałów.



Rys. 7. Praca rozprężania MW w teście wybuchu podwodnego

Zwraca uwagę niewielka różnica pracy ekspansji dla dwóch rodzajów emulgitów, pomimo ich różnego składu, a w szczególności większej ilości aluminium w ALANIE 3. Trudno jednak wyciągać wnioski dotyczące wpływu zawartości aluminium ze względu na wstępny etap prac związanych z opracowaniem pełnej metodyki pomiaru zdolności do wykonania pracy w teście wybuchu podwodnego.

6. Wnioski

Zaprezentowana w pracy metodyka pomiaru nadciśnienia w teście wybuchu podwodnego pozwala wyznaczyć pracę ekspansji materiałów wybuchowych detonacji pod wodą. Praca taka jest bliska energii, jaką potencjalnie posiadają materiały wybuchowe i która może zostać uwolniona w trakcie wybuchu w warunkach urabiania górotworu. Praca ta może być traktowana jako miara zdolności do wykonania pracy wyrażona w fizycznych wartościach

energii, co stanowi niewątpliwą zaletę tej metody w stosunku do standardowych metod pomiaru, takich jak próba Trauzla i wahadło balistyczne. Dodatkową zaletą tej metody jest fakt, że ilości używanego do prób materiału pozwalają na uwolnienie w trakcie wybuchu energii bliskiej energii potencjalnej zgromadzonej w materiale. Prace podjęte w Wojskowej Akademii Technicznej mają na celu opracowanie metodyki określania zdolności do wykonania pracy dla materiałów wybuchowych górniczych, co jest konieczne do uzyskania miarodajnych wyników testu zdolności do wykonania pracy.

LITERATURA

- [1] *Xuguang W.*: Emulsion explosives, Metallurgical Industry Press, Beijing 1994
- [2] *Rao P.S., Krishna Mohan V., Jyothi Bhasu V.C., Kumar A.S.*: Fragmentation of cast iron blocks by a confined explosive charge: A new performance evaluation test for commercial explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1994, 19, 149–154
- [3] *Martho A.G. Jr.*: A study of the technique of fragmentation of cast iron blocks by confined explosive charges as a tool for the performance evaluation of commercial explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1999, 24, 308–313
- [4] *Allum J.M., Cartwright M., Cooper J.*: Variation of emulsion explosive performance parameters with water content, *Proc. 28th International Annual Conference of ICT. Combustion and Detonation*, Karlsruhe, 24–27 June, 1997, 34-1–34.14
- [5] *Ravi Shankar G.S.R., Kumar A.S., Krishna Mohan V.*: On application of the plate dent test for the evaluation of emulsion explosives, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21, 70–73
- [6] *Kato Y., Takahashi K., Tori A., Kurokawa K., Hattori K.*: Underwater explosion of aluminized emulsion explosives, *Proc. 30th International Annual Conference of ICT, Energetic Materials. Modelling of Phenomena. Experimental Characterization. Environmental Engineering*, June – July 1999, Karlsruhe, 7-1–7.10
- [7] *Takahashi K., Murata K., Kato Y., Fujita M., Itoh S.*: Non-ideal detonation of emulsion explosives, *J. Mat. Proc. Technology* 1999, 85, 52–55
- [8] *Guo Ziru, Shen Zhaowu, Yao Gambin, Lu Shouxiang*: The influence of aluminium powder added to emulsion explosives on explosion strength, *Theory and Practice of Energetic Materials*, vol. V, part A, Science Press, Beijing – New York 2003
- [9] *Kato Y., Torii A., Ishida T., Hattori K.*: Correlation between detonation properties and underwater explosion performances of emulsion explosives, *Proc. 22nd International Annual Conference of ICT. Combustion and Reaction Kinetics*, Karlsruhe, July 2–5, 1991, 80-1–80.11

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.