Stosowanie materiałów wybuchowych emulsyjnych luzem w kopalniach rud

Usage of bulk emulsion explosives in ore mines

Mgr inż. Wojciech Ostiadel)*

Mgr inż. Marcin Szumny)*

Treść: Praktyka górnicza wskazuje, że dla określonych warunków geologiczno-górniczych powinno stosować się odpowiednio dobrany materiał wybuchowy, dopasowany do założonego efektu strzałowego, np. rozdrobnienie urobku. W celu uzyskania satysfakcjonującego rezultatu należy dokładnie zdefiniować parametry geotechniczne urabianej skały jak i parametry MW mające wpływ na urabialność skały. Rozwiązaniem pozwalającym na proste określenie, jaki MW należy używać w danych warunkach jest opracowana tzw. mapa energetyczna energii zastosowania MW. Stosując nowoczesne materiały wybuchowe luzem, istnieje możliwość regulacji *in situ* ich parametrów, przez co możliwe jest dopasowanie stosowanego MW do lokalnych warunków geotechnicznych.

Abstract: Mining practice shows that for certain geological and mining conditions, proper explosives matched to the intended effect of blasting, for example: fragmentation output should be applied. In order to obtain a satisfactory result, geotechnical and explosives parameters should be clearly defined and adjusted to the type of rocks. Simple solution to determine how explosives should be used in the given conditions is the development of the "Energy map". While using modern bulk explosives, their parameters can be adjusted „in situ", which can be adapted to the local geotechnical conditions.

Słowa kluczowe:

mapa energetyczna, materiały wybuchowe emulsyjne luzem

Key words:

energy map, bulk emulsion explosives

1. Parametry MW a parametry skały urabianej

Przystępując do wykonania metryki (dokumentacji) strzałowej w skale o określonych parametrach, należy ocenić czy dysponujemy MW, którego parametry umożliwiają prawidłowe i efektywne wykonanie roboty strzałowej. Jednym ze sposobów, choć mało precyzyjnym i obarczonym dość dużym błędem, jest porównanie gęstości akustycznej skał i MW. Badania wykazały, że przekazywanie energii wybuchu do calizny w otworze strzałowym zależy od stosunku gęstości akustycznej skały i MW. Jeżeli stosunek gęstości jest w granicach 0,2÷0,5, to tylko 0,55÷0,75% energii potencjalnej ładunku przechodziło do calizny, zmniejszenie wykorzystania energii wybuchu występuje, gdy stosunek ten jest większy od 1,5.

$$\frac{A_S}{A_{MW}} \tag{1}$$

gdzie:

A_S – gęstość akustyczna skały,

A_{MW} – gęstość akustyczna materiału wybuchowego

$$A_S = \rho \times u_p \tag{2}$$

gdzie:

ρ – gęstość skały,

u_p – prędkość fali podłużnej

$$A_{MW} = \sigma_{MW} \times D \tag{3}$$

gdzie:

σ_{MW} – gęstość MW,

D – prędkość detonacji MW

Znając gęstość akustyczną skały, którą można określić wystarczająco dokładnie, można na podstawie wzorów wyznaczyć w sposób orientacyjny parametry MW (Onderka 1992) takie jak:

- gęstość MW (σ_{MW}),
- prędkość detonacji MW,
- ciśnienie detonacji (p_d).

$$\sigma_{MW} = \frac{4(1235{,}6 \times A_S - 1{,}67 \times 10^9)}{D^2} \tag{3}$$

*) Orica Poland Sp. z o.o.

$$p_d = 1235{,}6 \times A_s - 1{,}67 \times 10^9 [\frac{N}{m^2}] \quad (4)$$

Tak wyznaczone parametry MW są wartościami orientacyjnymi i mogą posłużyć jako weryfikacja rozważanego MW w celu uniknięcia znaczących błędów w czasie projektowania roboty strzałowej.

2. Materiały wybuchowe luzem

Aktualnie powszechnie stosowaną, przez największe firmy produkujące materiały wybuchowe, zasadą jest wykonanie usługi strzałowej w oparciu o własną technologię z wykorzystaniem produkowanego *in situ* MW. Takie rozwiązanie gwarantuje bieżącą kontrolę produkcji i efektów wykorzystania MW. W kopalniach podziemnych możliwe są różne formy współpracy pomiędzy firmą dysponującą technologią produkcji MWE a odbiorcą:

- usługa polegająca na dostarczeniu do kopalni systemu załadunku MW luzem, szkolenie i wsparcie techniczne,
- usługa polegająca na wykonaniu kompleksowej roboty strzałowej.

Przykładowe materiały emulsyjne luzem oraz ich parametry podano w tab. 1 oraz 2.

Aktualnie wiodącą rolę przy doborze materiałów wybuchowych do danych warunków geotechnicznych przyjęły na siebie firmy produkujące MW i dostarczające technologię produkcji bezpośrednio do kopalni. W takich wypadkach poszukując odpowiedniego MW dla konkretnych skał należy kierować się wytycznymi producentów MW i dokonać stosownych prób. Na przykładzie firmy Orica możemy zauważyć, że dla określonych warunków geologiczno-technicznych w obrębie kopalń podziemnych i tuneli rekomenduje się różne typy MW.

Tabela 1. Materiały wybuchowe firmy Orica luzem, którym nadano numer identyfikacyjny WUG
Table. 1. Orica's bulk explosives and their identification number issued by WUG

Lp.	Nazwa MW luzem	Nr identyf.	Cechy
1	Fortis Coal-78	MW-PL-25/13-P	emulsyjny skalny, luzem
2	Fortis Coal 100	MW-PL-10/09-P	emulsyjny skalny, luzem
3	Fortran Extra-78	MW-PL-23/13-P	heavy ANFO, skalny, luzem
4	Fortran Coal 78	MW-PL-22/13-P	heavy ANFO, skalny, luzem
5	Exan Bulk	MW-PL-13/09-P	ANFO, skalny,,luzem
6	Centra Gold 100	MW-PL-11/09-P	emulsyjny,skalny, luzem
7	Centra Gold-78	MW-PL-24/13-P	emulsyjny,skalny, luzem
8	Subtek Charge CS	MW-PL-12/09-D	emulsyjny,skalny, luzem

Tabela 2. Parametry MW (TDS Orica)
Table 2. Parameters of explosives (TDS Orica)

	Fortis Coal-78	Fortis Coal -100	Fortan Extra -78	Fortan Coal -78	Exan Bulk	Centra Gold-100	Centra Gold-78	Subtek Charge CS
Gęstość, [g/cm^3]	1,23-1.24	0,9-1,2	0,93-0,98	0,93-0,98	0,84	0,8-1,4	1,22-1.24	0,8-1,4
Min. średnica otworu strzałowego [mm]	50	50	50	50	50	45	68	45
Maks. długość otworu strzałowego [m]	50	50	-	30	30	30	30	-
RWS [1]	-	81	-	-	100	81	-	86
RBS [2]	-	110	-	-	100	110	-	107
Maksymalny czas przebywania w otworze [dni]	7	7	7	7	3	7	7	6
Prędkość detonacji [m/s]	≥ 3500	≥ 3500	≥ 2700	≥ 2700	2500	≥3200	≥3500	≥3200

[1] RWS (*Relative Weight Strenght*) – Względna energia masowa
[2] RBS (*Relative Bulk Strenght*) – Wzgledna energia objętościowa
Wskaźniki RWS oraz RBS są odniesione do efektywnej energii ANFO dla gęstości 0,8 g/cm^3, która wynosi ok. 2,30 MJ/kg. Energia została obliczona przy założeniu idealnej detonacji i ciśnieniu granicznym 100 MPa.

Tabela 3. Subtek Charge™ (TDS Orica 2016)
Table 3. Subtek Charge™ (TDS Orica 2016)

Gęstość [g/cm^3]	0,8	1,0	1,2
Min. średnica otworu strzałowego [mm]	38	45	64
Max. długość otworu strzałowego [m]	50	35	5
Prędkość detonacji [m/s]	3000-6500		
RWS [%]	67	79	92
RBS [%]	67	99	138
Czas przebywania w otworze strzałowym [dni]	7		

Tabela 4. Subtek Velcro™ (TDS Orica 2016)
Table 4. Subtek Velcro™ (TDS Orica 2016)

Gęstość [g/cm³]	0,8	1,0	1,2
Min. średnica otworu strzałowego [mm]	38	45	64
Max. długość otworu strzałowego [m]	50	35	5
Prędkość detonacji [m/s]	3000-6500		
RWS [%]	67	79	92
RBS [%]	67	99	138
Czas przebywania w otworze strzałowym [dni]	30		

Tabela 5. Subtek Eclipse™ (TDS Orica 2016)
Table 5. Subtek Eclipse™ (TDS Orica 2016)

Gęstość [g/cm³]	0,8	1,0	1,2
Min. średnica otworu strzałowego [mm]	38	45	64
Max. długość otworu strzałowego [m]	50	35	5
Prędkość detonacji [m/s]	3000-6500		
RWS [%]	71	84	97
RBS [%]	71	105	145
Czas przebywania w otworze strzałowym [dni]			

Tabela 6. Subtek Control™ (TDS Orica 2016)
Table 6. Subtek Control™ (TDS Orica 2016)

Gęstość [g/cm³]	0,55	1,0	1,2
Min. średnica otworu strzałowego [mm]	38	45	64
Prędkość detonacji [m/s]	2500-6500		
RBS [%]	37-145		
Czas przebywania w otworze strzałowym [dni]	30		

Tabela 7. Civec™ (TDS Orica 2016)
Table 7. Civec™ (TDS Orica 2016)

Gęstość [g/cm³]	0,9
Min. koncentracja załadunku MW [g/m]	350
Min. średnica otworu strzałowego [mm]	38
Min. średnica załadowanego MW [mm]	20
Prędkość detonacji [m/s]	3000-5000
RWS	81
RBW	91
Czas przebywania w otworze strzałowym [dni]	2

Przedstawione MW mają zastosowanie w górnictwie podziemnym rud i tak: Subtek Velcro™ i Subtek Eclipse™ powinny być stosowane w otworach wierconych w stropie, Subtek Eclipse™ w reaktywnych skałach, Subtek Charge™ i Subtek Control™ w wyrobiskach poziomych i robotach tunelowych, a Civec™ w przypadku, gdy zachodzi konieczność zmniejszenia uszkodzeń obrysu wyrobiska. Analizując tab. 3-7, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem gęstości MWE zwiększa się minimalna średnica otworu strzałowego i zmniejsza się długość otworu strzałowego, który może być nim załadowany.

3. Modułowy system załadunku materiałów wybuchowych emulsyjnych

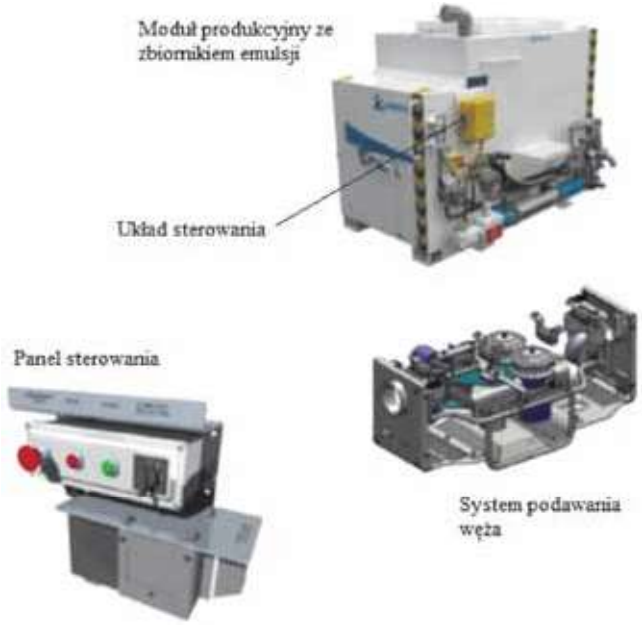
Materiały wybuchowe emulsyjne luzem mogą być załadowane do otworów strzałowych przy użyciu stosownych urządzeń. Moduły mieszalniczo-załadowcze projektowane i budowane są zazwyczaj pod określony MWE. Obecnie stosowane moduły mają możliwość zmiany gęstości produkowanego MWE. Zmieniając gęstość MWE wprowadzanego do otworu strzałowego, można zmieniać parametry metryki strzałowej (Maranda i in. 2013, 2014), a tym samym w ekonomiczny sposób wykorzystać MWE do wykonania roboty strzałowej. Modułami, które spełniały wymogi bezpiecznej pracy w polskich podziemnych kopalniach rud były moduły RP-T (Blastexpol/Maxam), U114LC (AEL) i Mini SSE (Dyno Nobel/Orica), które mimo odmiennych konstrukcji spełniały w praktyce założenia konstruktorów, czyli wykonywana przez nich praca wytwarzania i załadunku MWE do otworów strzałowych była bezpieczna i efektywna. W jednej z kopalń w Australii przez okres ok. 2 lat analizowano koszty wykonywania robót strzałowych z użyciem materiału wybuchowego typu ANFO i MWE luzem. Po tym okresie stwierdzono, że nastąpiło zmniejszenie o 25% kosztów wykonywania robót strzałowych po zastosowaniu MWE luzem. Analizowano następujące koszty związane z prowadzonymi robotami strzałowymi:

Analiza tab. 8 wskazuje, że w sposób zasadniczy zmniejszyły się koszty wiercenia otworów strzałowych (mniejsza

Tabela 8. Koszty urabiania tony urobku w kopalni (Materiały Orica)
Table 8. Exploitation costs of 1 ton of ore (Orica brochures)

	ANFO	MWE luzem
Wiercenie	70 %	63,3 %
Materiał wybuchowy	10 %	16,9 %
Koszty pracownicze	12,5 %	13,3 %
Sprzęt	7,5 %	6,5 %

liczba otworów strzałowych), a wzrósł koszt materiału wybuchowego. Przykładową konstrukcją systemu mieszalniczo-załadowczego jest moduł o nazwie HandiLoader firmy Orica, który posiada zbiornik na emulsję o pojemności 1000 l. Umożliwia to załadunek do otworu strzałowego wężem o średnicy 20 mm i długości do 30 m z wydajnością do 20 kg MWE na minutę. Wymiary tego modułu to 1100x1745x1600 mm. System ma możliwość sterowania radiowego oraz automatycznego podawania węża załadowczego, co umożliwia wykorzystanie systemu String Loading (możliwość zmiany koncentracji MWE w otworze strzałowym). Moduł HandiLoader składa się podstawowych elementów konstrukcyjnych, jak zbiornik matrycy emulsji, panel sterowania modułem urządzenia podającego wąż załadowczy (rys. 1), a schemat ideowy modułu przedstawia rys. 2

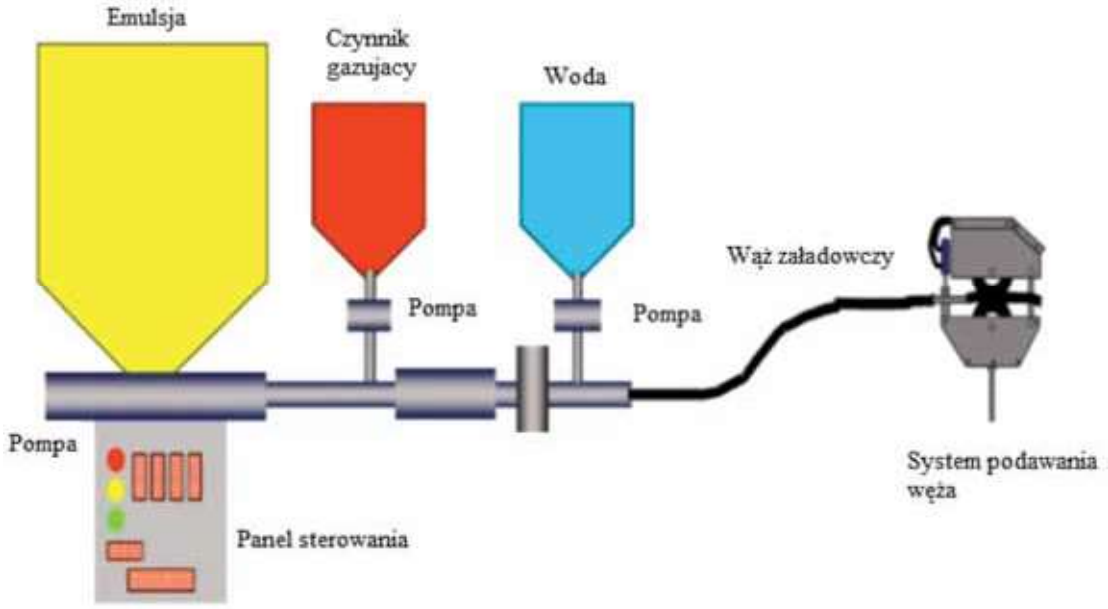


Rys. 1. Elementy modułu HandiLoader
Fig. 1. Elements of HandiLoader module

W zależności od potrzeb buduje się moduły o nazwie MaxiCharger (większa pojemność zbiornika i prędkość załadunku), ale też moduły o nazwie MiniLoader (rys. 3), które mogą być zabudowane na pojazdach transportowych o mniejszych gabarytach typu SWT. Moduł MiniLoader składa się z modułu o wymiarach 90x51x56 cm, waga modułu 48 kg i zbiornika emulsji o pojemności 600-1000 l. Odmiennym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest moduł BudLoader (rys. 4) przeznaczony do budowy szybów o wymiarach 1,4 x 1,8 m, posiadający wąż załadowczy o średnicy 22 mm i długości 15m. Budowane wozy strzałowe, na których zabudowuje się moduły mieszalniczo-załadowcze MWE w zależności od potrzeb mogą mieć zabudowane wysięgniki, miejsca dla przewozu strzałowych (osoby) i miejsca do przewozu określonej ilości środków strzałowych.

4. Stosowanie MWE luzem

Efektywne wykonanie prac strzałowych musi odpowiadać wymaganiom technicznym oraz być możliwie tanie. Jednym ze wskaźników stosowanych w pracach z użyciem materiałów wybuchowych jest jednostkowe zużycie MW. Wymagane



Rys. 2. Schemat ideowy modułu HandiLoader
Fig. 2. Scheme of HandiLoader module

Rys. 3. Moduł MiniLoader
Fig. 3. MiniLoader module

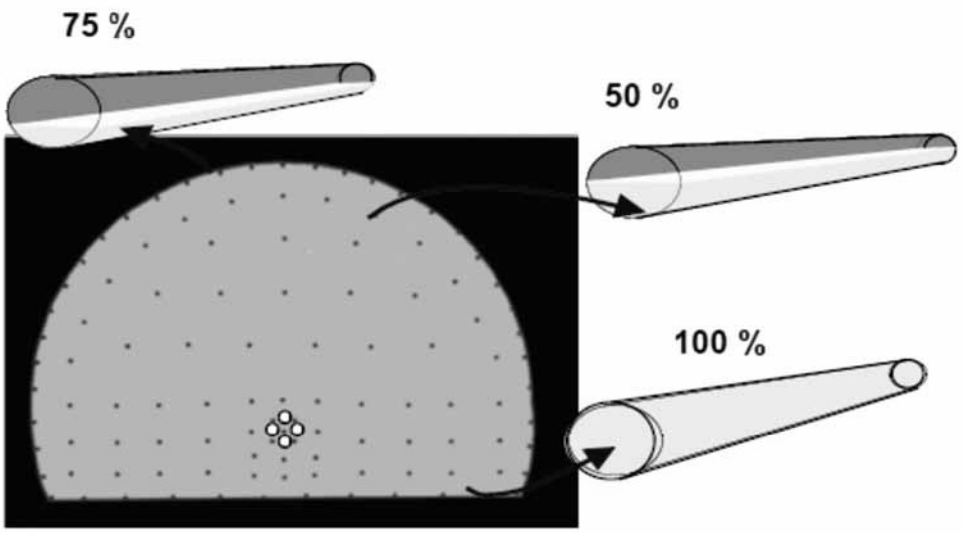
Rys. 4. Moduł BudLoader
Fig. 4. BudLoader module

zużycie jednostkowe można obliczyć wg wzoru (Morawa, Barański 2015):

$$q = 0{,}13 \times \gamma \times \sqrt[4]{f} \times (0{,}6 + 3{,}3 \times d \times d_s) \times \\ \times (0{,}5/d_k)^{0{,}4} \times (1000/Q) \quad (4)$$

gdzie:
- q – zużycie jednostkowe MW [kg/m^3],
- γ – gęstość skały [kg/m^{-3}],
- f – wskaźnik zwięzłości wg Protodiakonowa,
- d – średnica otworu strzałowego [mm],
- $ds.$ – średnie odległości w skale między szczelinami [m],
- d_k – rozmiar żądanego ziarna [m],
- Q – ciepło wybuchu [kcal/kg].

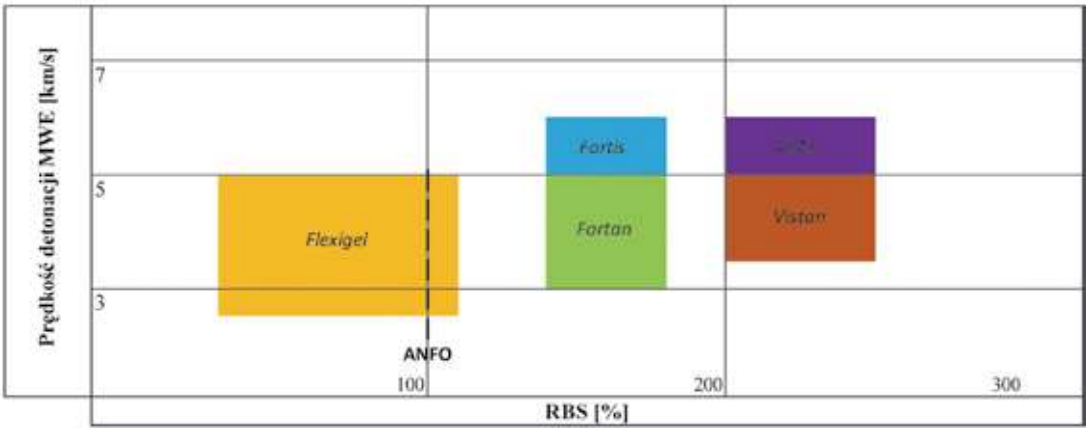
Analiza powyższego wzoru prowadzi do wniosku, że możliwość wpływu na zużycie jednostkowe jest możliwe w zasadzie w dwóch przypadkach, a mianowicie poprzez zmianę średnicy otworu oraz rodzaju MW (ciepło wybuchu). W przypadku polskich kopalń rud średnica otworów strzałowych mieści się w zakresie od 45 do 51 mm, tak więc rzeczywistym parametrem mającym wpływ na uzyskane wyniki jest ciepło wybuchu.



Rys. 5. Możliwość redukcji MWE luzem w przodku
Fig. 5. Possibility of bulk emulsion reduction in the face

Tabela 9. Zużycie MW w latach 2007-2008 w ZG. Polkowice –Sieroszowice (Raport Techniczny 2013, Mertuszka 2015)
Table 9. Use of explosives between 2007 and 2008 in Polkowice-Sieroszowice mine (Technical Report 2013, Mertuszka 2015)

Rok	Ilość wydobytej rudy [mil t]	Ilość MW [kg]	Ilość MWE luzem [kg]	[%]	[kgMW/Mgrudy]
1	2	3	4	5	6
2007	10,70	5587313	1900649	34	0,52
2008	10,41	6820993	4060217	59	0,65



Rys. 6. Mapa Energetyczna MWE luzem
Fig. 6. Energy map of Orica bulk emulsion explosives

W kopalniach KGHM roboty strzałowe wykonuje się w skałach takich jak: dolomity, łupki i piaskowce o zróżnicowanej miąższości, co wskazuje, że należy stosować MWE o zróżnicowanych parametrach. Obecnie stosuje się tylko Emulinit-7L (Q-3069 [kJ/kg]), (Nitroerg 2015) i RP-T2 (Q-brak danych). Oprócz zastosowania odpowiedniego MWE istnieje też inne rozwiązanie techniczne, które w sposób zasadniczy może zmniejszyć zużycie MWE nawet do 40 %. Rozwiązanie to jest oparte na metodzie zmiany koncentracji MWE w otworach strzałowych załadowanych w przodku. Aby było to technicznie możliwe należy zastosować moduł mieszalniczo-załadowczy ze stosownym systemem, w którym jest możliwość wyciągania węża załadowczego z regulowaną prędkością i MWE luzem o minimalnej średnicy krytycznej rzędu 30 mm. W polskich kopalniach rud MWE luzem stanowi około 80 % i jeżeli mamy możliwość zmniejszenia tej ilości od 30-40 %, wydaje się zasadne podjąć próbę realizacji takiego rozwiązania.

5. Podsumowanie

Podjęcie decyzji (ok. 17 lat temu) o zastosowaniu MWE luzem, było jak najbardziej prawidłowe, ale czy w pełni wykorzystano możliwości techniczne i ekonomiczne tych materiałów wybuchowych? Wydaje się, że nie i istnieje jeszcze duży margines na poprawę.

Tab. 9 wskazuje, że wzrost procentowy zużycia MWE luzem powoduje wzrost wskaźnika zużycia MW, ale ten aspekt należy rozpatrzeć pod względem ekonomicznym, co nie jest przedmiotem tego artykułu i nie powinno to prowadzić do wniosku o niezasadnym używaniu MWE luzem. Należy jednak zadbać o inne możliwe rozwiązania techniczne, jakie są możliwe, przy stosowaniu MWE luzem. Jednym z nich jest możliwość ładowania MWE luzem do otworów strzałowych o zmiennej koncentracji MW na 1mb otworu strzałowego. Opracowując MWE luzem dla kopalń rud, należy również brać pod uwagę wpływ czasu oraz temperatury pierwotnej skał, w których są wykonywane otwory strzałowe na zdolność detonacji (Cenian i in. 2015).

W odniesieniu do właściwego doboru MW firma Orica przygotowała poglądowe narzędzie w postaci tzw. Mapy Energetycznej Energi MWE (rys.6), aby w łatwy sposób przeanalizować dostępne materiały wybuchowe. Aktualnie trwają prace nad nową generacją materiałów wybuchowych o parametrach wyższych niż dotychczas stosowane.

Materiały wybuchowe emulsyjne luzem:

- Flexigel, MWE przeznaczony dla skał słabych i miejsc wymagających ograniczenia drgań parasejsmicznych,
- Fortis™, MWE luzem typu „heavy ANFO" przeznaczony do otworów suchych,
- Vistis™ ,MWE luzem wodoodporny, zaliczany do tzw. materiałów wysokoenergetycznych,
- Vistan™, przeznaczony do otworów suchych.

Literatura

CENIAN B., WOJEWÓDKA A., PYTEL W., MERTUSZKA P. 2015 – Wpływ czasu na zdolność detonowania materiałów wybuchowych emulsyjnych. „Wiadomości Górnicze" nr 2, s. 155–161

MARANDA A., DROBYSZ B., PASZULA J. 2014 – Badania parametrów detonacyjnych materiałów wybuchowych emulsyjnych o niskiej gęstości modyfikowanej mikrobalonami. „CHEMIK" 68, 1, 17–22.

MARANDA A., GOŁĄBEK B., KASPERSKI J. 2013 – Wpływ stosowania materiałów wybuchowych na stopień zanieczyszczenia środowiska. Warsztaty Górnicze 2013. Mat. Symp. s. 427 – 433.

Materiały promocyjne firmy Orica

MERTUSZKA P. 2015 – Optymalizacja parametrów strzelań przodków dla uzyskania efektu wzmocnienia fali sprężystej. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska. Wrocław.

MORAWA R., BARAŃSKI K. 2015 – Prowadzenie robót strzałowych w rejonie chronionych obiektów budowlanych. Materiały konferencyjne SEP 2015. Kraków

ONDERKA Z. 1992 – Technika strzelnicza w górnictwie odkrywkowym. Skrypt uczelniany AGH nr 1241. Kraków, s. 38-39

Raport techniczny dotyczący produkcji miedzi i srebra przez KGHM Polska Miedź SA(…) luty 2013. Opracowanie Micon International CO. Limited.

TDS Orica 2016 - Dane techniczne materiałów Orica.

Artykuł wpłynął do redakcji – grudzień 2016
Artykuł akceptowano do druku 15.02.2017