

# Wykonywanie otworów strzałowych technologią wybuchową przy zastosowaniu kumulacyjnej głowicy PG-7M

## Blasthole performance by means of explosive techniques using PG-7M shaped charged warhead



*Mgr inż. Mateusz Pytlik<sup>\*)</sup>*



*Dr Wojciech Burian<sup>\*\*)</sup>*



*Plk dr hab. inż. Mariusz Magier,  
prof. WITU<sup>\*\*\*)</sup>*



*Plk. dr hab. inż. Jacek Janiszewski,  
prof. WAT<sup>\*\*\*)</sup>*



*Dr inż. Jacek Sobala<sup>\*)</sup>*



*Mgr inż. Jerzy Lachmajer<sup>\*\*\*\*\*)</sup>*



*Mgr inż. Bartosz Czajka<sup>\*\*\*\*\*)</sup>*



*Mgr inż. Michał Szastok<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Robert Hildebrandt<sup>\*)</sup>*

<sup>\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

<sup>\*\*)</sup> Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach

<sup>\*\*\*)</sup> Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia w Zielonce

<sup>\*\*\*\*)</sup> Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

<sup>\*\*\*\*\*)</sup> Zakłady Chemiczne Nitro-Chem S.A. w Bydgoszczy

**Treść:** Głównym sposobem urabiania skał w górnictwie podziemnym i odkrywkowym jest wykorzystanie materiałów wybuchowych. Najbardziej optymalnym sposobem urobienia skały jest w tym przypadku wprowadzenie ładunku do otworu strzałowego. Proces wiercenia otworów w porównaniu do załadunku i detonacji materiału wybuchowego jest najbardziej czasochłonną operacją. Dodatkowo względy techniczne mogą utrudniać lub uniemożliwiać wykonanie otworów strzałowych. Głowice kumulacyjne są głównie stosowane do celów wojskowych, jednak wykorzystuje się je również w górnictwie naftowym i gazowym. Wyeliminowanie procesu wiercenia poprzez zastosowanie ładunków kumulacyjnych może znacząco wpływać na zwiększenie postępów drążenia. Niniejsza praca ma na celu określenie możliwości wykonywania otworów strzałowych, wykorzystując głowicę kumulacyjnego pocisku przeciwpancernego PG-7M do granatnika RPG-7. Wyniki przeprowadzonych badań będą służyły do opracowania, wykonania i wprowadzenia do górnictwa nowego typu ładunków kumulacyjnych, które w przyszłości umożliwią zwiększenie efektywności górnictwa przy utrzymaniu lub obniżeniu kosztów.

**Abstract:** The use of explosives constitutes the primary method of rock extraction in underground and surface mining. The most optimal method of rock extraction in this case is the insertion of a charge into a blasthole. Compared to the loading and detonation of explosives, the blasthole drilling process is the most time-consuming operation. Additionally, technical factors may render the drilling of blastholes difficult or impossible. Shaped charges are primarily used for military purposes, but they also find application in oil and gas mining. Elimination of the drilling process based on the application of shaped charges could significantly increase the progress of tunnelling. The purpose of this article is to determine the possibility to produce blastholes through the application of the warheads PG-7M anti-tank projectiles used in RPG-7 rocket-propelled grenade launchers. The results of the conducted tests will serve to develop, produce and implement a new type of shaped charge for mining purposes, which in the future will increase the efficiency of mining while retaining or lowering its costs.

#### **Słowa kluczowe:**

*ładunki kumulacyjne, otwory strzałowe, urabianie*

#### **Keywords:**

*shaped charges, blast holes, mining, drilling*

## **1. Wprowadzenie**

W górnictwie zużywa się większość (około 98%) materiałów wybuchowych do użytku cywilnego. Zużycie materiałów wybuchowych w polskim górnictwie wynosi około 41 mln kg, a zużycie zapalników to około 11 mln sztuk (Rawicki i in. 2017). Ilość wykonywanych otworów strzałowych można oszacować na podstawie ilości zużytych zapalników w danym roku (najczęściej przypada jeden zapalnik na otwór strzałowy). W większości przypadków wykonywanie otworów strzałowych opiera się na wierceniu udarowym, polegającym na kruszeniu skały na dnie wierconego otworu działaniem uderzającego w nią ostrza. Klasyfikacja zwięzłości skał w złożu pozwala w pewnym stopniu na racjonalny dobór maszyny wierzącej otwory strzałowe. Skały mają jednak bardzo różne własności – często zmieniające się w tym samym złożu – przez co efekty wiercenia w tym samym górotworze mogą być skrajnie różne. Czas wiercenia jednego metra otworu może wahać się od kilku do kilkudziesięciu minut – biorąc pod uwagę długość otworów oraz ich ilość, może to znacząco wpływać na efektywność wydobywania.

Wyeliminowanie procesu wiercenia polegające na zastosowaniu ładunków kumulacyjnych może znacząco wpływać na zwiększenie postępów drążenia.

Głowice kumulacyjne stosowane są głównie w celach wojskowych, gdzie ich konstrukcja znana była już w czasie I wojny światowej (Galiński 2002, Walters, Zukas 1989). Przy rozpoczęciu drążenia głębokich otworów, rozpoczęto ich stosowanie również w górnictwie, głównie naftowym i gazowym (Wilk, Zygmunt 2007). Prowadzone prace w ramach projektu badawczego mają na celu dostosowanie i opracowanie nowych ładunków kumulacyjnych do górnictwa, aby poprzez ich zastosowanie zwiększyć efektywność wydobywania, obniżyć jego koszty oraz wprowadzić nowe możliwości techniczne wykonywania otworów strzałowych metodą wybuchową (Burian i in. 2016, Magier i in. 2016). Ładunki kumulacyjne do zastosowań w górnictwie, w przeciwieństwie do tych stosowanych do celów wojskowych, będą musiały różnić się

między innymi konstrukcją wkładki, która będzie dostosowana do wymagań wykonywania otworów dla różnych typów górnictwa. Efektem detonacji tych ładunków będą musiały być otwory o jednorodnym przekroju poprzecznym oraz średnicy, która umożliwi w kolejnym etapie wprowadzenie materiałów wybuchowych nabojujących lub luzem (dodatkowo należy uwzględnić konieczność wprowadzenia węża załadunkowego). Trudnością w wykonaniu otworów o wymaganych parametrach może być fakt, że ośrodek skalny może cechować się różną gęstością, a dodatkowo może posiadać liczne nieciągłości. Jako wstępne założenia dla profilu otworu strzałowego uzyskanego metodą wybuchową przyjęto: średnica minimum 40 mm oraz długość od 1 do 3 m.

Pierwszym etapem prac mających na celu zaprojektowanie nowych układów kumulacyjnych jest przeprowadzenie badań na istniejących wojskowych głowicach o działaniu kumulacyjnym. Dzięki przeprowadzeniu tych badań możliwe jest określenie przybliżonych parametrów konstrukcyjnych projektowanych wkładek. Krok ten umożliwi znaczne skrócenie fazy opracowania konstrukcji nowych ładunków kumulacyjnych. Do badań wytypowano głowicę kumulacyjną pocisku przeciwpancernego PG-7M do granatników RPG-7.

## **2. Głowica kumulacyjna pocisku przeciwpancernego PG-7M do granatnika RPG-7**

Do przeprowadzenia prób wykorzystano standardowy nabój przeciwpancerny z pojedynczą głowicą kumulacyjną typu PG-7M, który umożliwił przebicie ponad 300 mm stali pancerniej RHA (*Rolled Homogenous Armour*). Głowicę PG-7M wykorzystano do zbadania możliwości do określenia głębokości penetracji materiału skalnego. Miedziana wkładka kumulacyjna zastosowana w tej głowicy ma kształt stożkowy o średnicy podstawy wynoszącej 70 mm oraz zawiera około 300 g materiału wybuchowego bazującego na heksogenie (RDX). W zastosowaniach wojskowych wymagane jest główne przebicie systemu opancerzenia lub systemu umocnień



(np. bunkry), a nieistotne są parametry takie jak średnica czy krater wejściowy. W przypadku przyszłego zastosowania w przemyśle wydobywczym ładunków kumulacyjnych, muszą one drążyć otwory o jednorodnym przekroju poprzecznym oraz o określonej średnicy, co jest istotne ze względu na konieczność wprowadzenia materiału wybuchowego do uzyskanego otworu (kolejny cykl technologiczny). Najbardziej istotnym czynnikiem przy konstrukcji ładunku kumulacyjnego jest dobór materiału, z którego wykonana jest wkładka kumulacyjna, ponieważ od rodzaju tego materiału zależy wprost głębokość penetracji ( $P$ ) ośrodka, która określona jest następującą zależnością (Pack i in. 1950):

$$P = L \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_c} \left( 1 - \frac{\alpha Y}{\rho_s V^2} \right)} \quad (1)$$

gdzie:

- $\rho_s$  i  $\rho_c$  – opisują gęstość materiału strumienia i celu,
- $L$  – długość penetratora, tj. skumulowana długość strumienia kumulacyjnego,

- $Y$  – dynamiczną granicę plastyczności celu,
- $V$  – prędkość penetratora (strumienia),
- ( $\alpha$ ) – współczynnik proporcjonalności można odnieść do kryterium zniszczenia materiału Johnsona (Johnson 1972, Li 2011).

### 3. Próby poligonowe

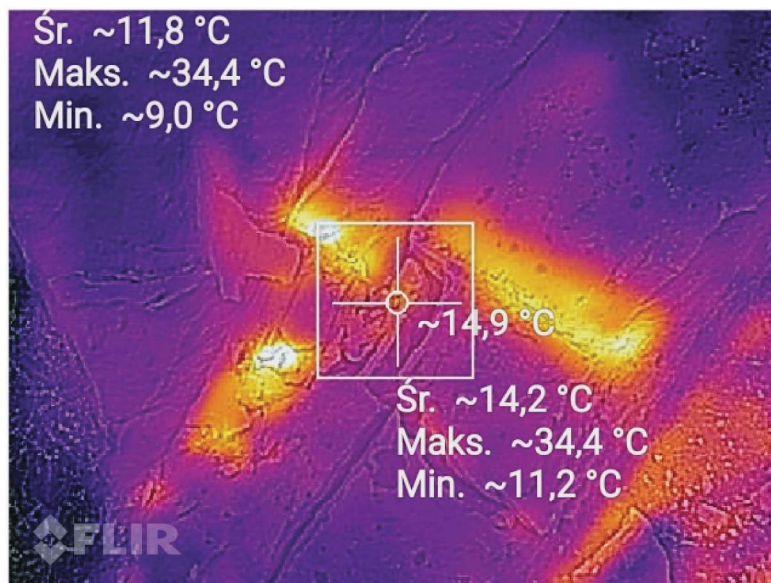
Na poligonie Wojskowego Instytut Technicznego Uzbrojenia w Zielonce przeprowadzono próby na specjalnie przygotowanych blokach piaskowca magurskiego z wykorzystaniem głowicy PG-7M. Blok skalny, który został wykorzystany do badań z zastosowaniem głowicy PG-7M posiadał wymiary: długość maks. 280 cm, szerokość maks. 130 cm, wysokość maks. 105 cm. Na rys. 1 przedstawiono zdjęcie bloku skalnego oraz sposób posadowienia głowicy PG-7M. Głowicę przystawiono do bloku skalnego w odległości 5 cm. Na rys. 2 pokazano zdjęcie fragmentów bloku po detonacji głowicy PG-7M.



Rys. 1. Zdjęcie bloku skalnego oraz sposób pozycjonowania głowicy PG-7M  
Fig. 1. View of a rock block and the placement method of the PG-7M warhead



Rys. 2. Zdjęcie bloku skalnego po detonacji głowicy PG-7M  
Fig. 2. View of the rock block after the detonation of the PG-7M warhead



Rys. 3. Zdjęcie z kamery termowizyjnej bloku skalnego po detonacji głowicy PG-7M

Fig. 3. Thermal camera image of the rock block after the detonation of the PG-7M warhead

Przeprowadzone badanie pokazało, że głowica PG-7M spowodowała fragmentację bloku skalnego, uniemożliwiając jednoznaczny pomiar głębokości krateru powstałego w wyniku oddziaływania strumienia kumulacyjnego. Na fragmentach bloku zidentyfikowano ślady strumienia kumulacyjnego przy pomocy kamery termowizyjnej (blok skalny w miejscu działania strumienia kumulacyjnego miał o około 20°C wyższą temperaturę niż otoczenie) i na tej podstawie oszacowano głębokość penetracji na około 650-800 mm (rys. 3).

Po szczegółowych oględzinach fragmentów materiału skalnego stwierdzono, że bloki pokryte były siatką pęknięć, a w wyniku detonacji głowicy kumulacyjnej nastąpiła dalsza propagacja pęknięć prowadząca do całkowitej fragmentacji badanego bloku.

#### 4. Próby w warunkach Kopalni Doświadczalnej „Barbara”

Po próbach poligonowych stwierdzono konieczność wykonywania prób w osrodku skrępowanym (z dodatkowym wzmocnieniem), gdyż w przeciwnym razie energia strumienia kumulacyjnego jest rozpraszana i wywołuje fragmentację bloku skalnego, co utrudnia dokładną ocenę możliwości wykonywania otworów strzałowych przy wykorzystaniu głowic kumulacyjnych. Jednocześnie w celu przyszłego wykonania porównania różnych typów głowic kumulacyjnych istotną kwestią jest prowadzenie prac na jednorodnym materiale, którego parametry mogą być odtworzone.

W tym celu wykonano bloki cementowe ze zbrojeniem (6 sztuk prętów zbrojeniowych). Do ich wykonania wykorzystano zaprawę cementową 2PCM20 z plastyfikatorem, którą wypełniono podwójne rury z polichlorku winylu o długości 1450 mm, średnicy wewnętrznej 500 mm i zewnętrznej 569 mm. W celu zwiększenia odporności bloku na pęknięcie, w rurach umieszczono pręty zbrojeniowe (rys. 4). W trakcie wykonywania bloków cementowych odlano także próbki, dla których oznaczano wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, gęstość objętościową i rzeczywistą (tabela 1).

Tak przygotowane bloki umieszczono w podziemnym chodniku doświadczalnym Kopalni Doświadczalnej „Barbara” na poziomie 30 m. Bloki ustawiono w pozycji poziomej na spągu wyrobiska, zaś głowice PG-7M były przykładane do powierzchni czołowej bloku i pozycjonowane za pomocą podsypki piaskowej. Widok układu doświadczalnego przed detonacją głowicy kumulacyjnej oraz widok sfragmentowanego bloku po próbie wybuchowego drażenia zaprezentowano na rys. 5.

W wyniku przeprowadzonego testu stwierdzono dalej niedostateczne zabezpieczenie bloku cementowego przed jego rozkruszeniem. Koniecznym zatem okazało się wykonanie specjalnej osłony, dzięki której w bloku, po przeprowadzonej detonacji ładunku kumulacyjnego, pojawi się jedynie otwór. W tym celu skonstruowano specjalną osłonę, do której wprowadzono przygotowane wcześniej bloki cementowe. Składała się ona ze stalowej rury o grubości 8 mm i średnicy zewnętrznej 708 mm. W celu dodatkowego zabezpieczenia bloku cementowego, pomiędzy rurę z polichlorku winylu a rurę stalową wprowadzono drobnoziarnisty piasek, który następnie został poddany wodnemu zagęszczeniu. Całą konstrukcję bloku zaprezentowano na schemacie na rysunku 6.

Tak przygotowany blok ponownie umieszczono w chodniku doświadczalnym i przeprowadzono dla niego testy z wykorzystaniem głowicy PG-7M (rys. 7).

Po próbie badawczej stwierdzono niewielkie spękania bloku, a powstały w nim otwór miał głębokość ok. 110 mm. W celu dokładnej analizy profilu otworu wyjęto blok cementowy z osłony stalowej i przecięto go na pół (rys. 8), po czym dokonano jego dokładnego obmiaru. Wyniki pomiarów zaprezentowano na rysunku 9. Na ich podstawie można stwierdzić, że średnica otworu na jego ok. 950 mm długości (z wyjątkiem części w pobliżu otworu wlotowego i dna krateru) zawierała się w zakresie od około 44 do 62 mm.





Rys. 4. Przygotowane bloki cementowe w osłonie z prętami zbrojonymi  
 Fig. 4. Prepared cement blocks in housing with reinforcement bars

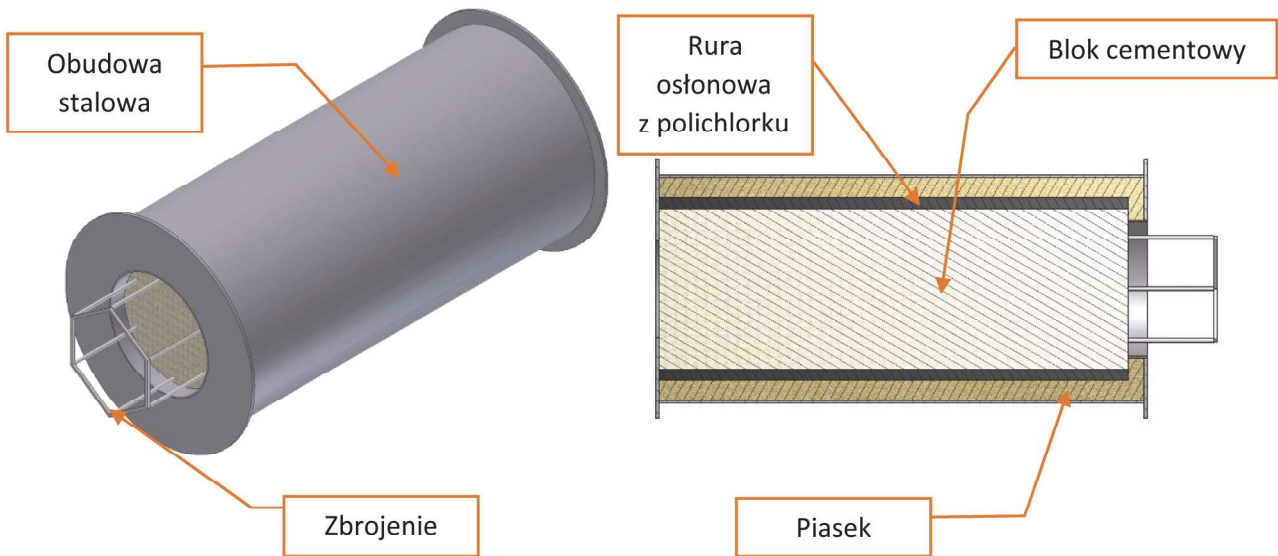
Tabela 1

Próbka	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $R_c$ [MPa]	Gęstość objętościowa $\rho_o$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Gęstość rzeczywista $\rho_r$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Nr 1	13,5	1954	2567
Nr 2	15,3	1974	2555
Średnia wartość	14,4	1964	2561



Rys. 5. Widok bloku cementowego z przyłożoną głowicą kumulacyjną (po lewej) oraz sfragmentowanego bloku cementowego po detonacji głowicy PG-7M (po prawej)

Fig. 5. View of a cement block with the shaped charge warhead (left) and crushed cement block after PG-7M warhead detonation



Rys. 6. Blok cementowy w specjalnej osłonie  
Fig. 6. Cement block in a special casing



Rys. 7. Widok bloku cementowego w obudowie stalowej z przyłożoną głowicą kumulacyjną (po lewej) oraz jego powierzchnię czołową po detonacji ładunku kumulacyjnego  
Fig. 7. View of a cement block in the steel casing with the shaped charge warhead (left) and its front block surface after shaped charge detonation (right)

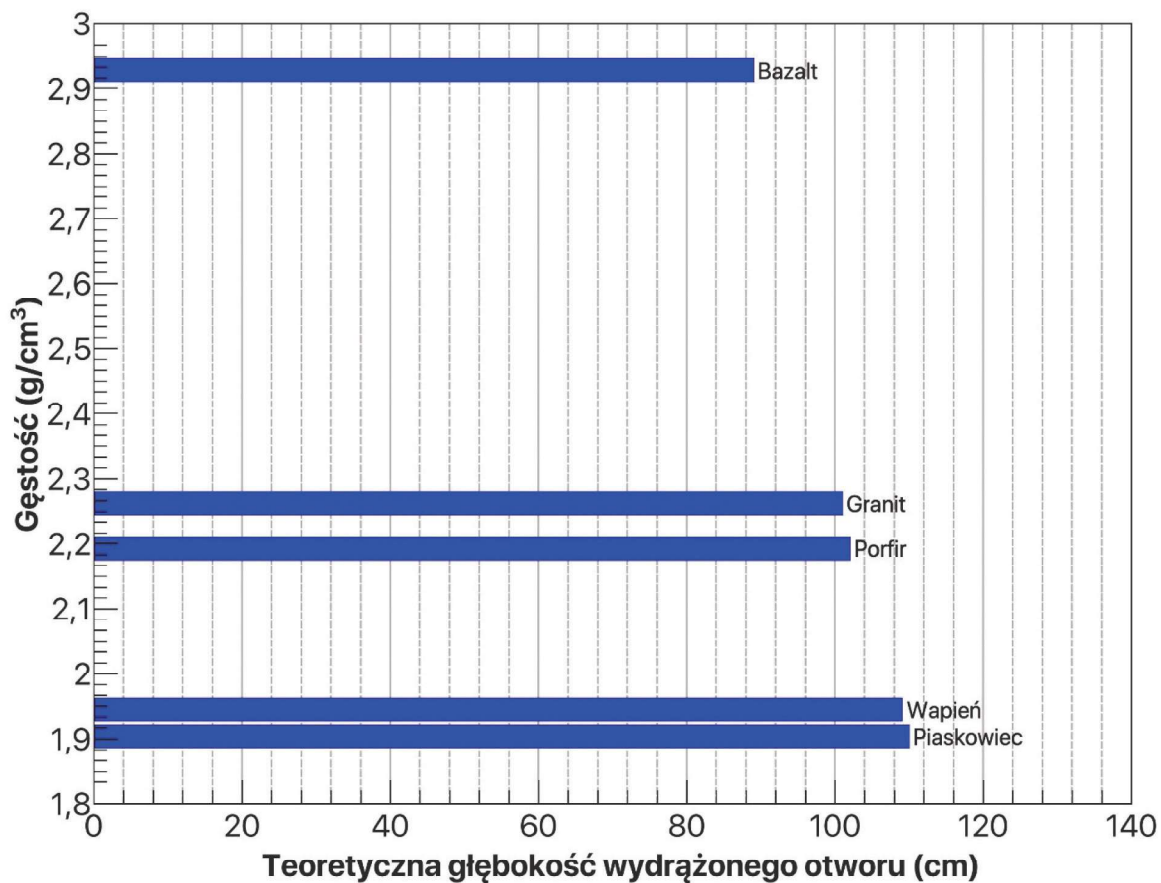
Z zależności (1) oraz na podstawie pomiaru głębokości otworu uzyskanego w bloku cementowym oszacowano w przybliżony sposób (nie uwzględniając części związanej z właściwościami mechanicznymi) skumulowaną długość strumienia kumulacyjnego wygenerowanego przez ładunek kumulacyjny PG-7M. Obliczona w ten sposób długość strumienia wyniosła 510 mm. Wartość tę przyjęto jako podstawę do oszacowania możliwej do osiągnięcia głębokości drażonych przez ładunek PG-7M otworów w materiale skalnym o różnej gęstości. Wyniki obliczeń szacunkowych głębokości penetracji w różnych materiałach skalnych przedstawiono na rys. 10. Uzyskane wyniki pokazują, że nawet przy wykorzystaniu ładunku kumulacyjnego, który został zaprojektowany do celów wojskowych istnieje możliwość wydrążenia otworów o znacznych głębokościach.

Z uwagi na fakt, że głowice kumulacyjne w przyszłości planuje się stosować w górnictwie podziemnym, bardzo istotną kwestią jest spełnienie wymagań pod kątem powstawania szkodliwych gazów postrzałowych pochodzących z detonacji ładunków kumulacyjnych. Obowiązujące w Polsce wymagania dotyczące dopuszczania materiałów wybuchowych do użytku w podziemnych zakładach górniczych określają maksymalne zawartości tlenków azotu i tlenku węgla w gazach postrzałowych (Zawadzka-Małota 2009):

- tlenek węgla (CO) nie więcej niż 0,135% (V/V), tj. 27 l/kg MW,
- tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ) nie więcej niż 0,080% (V/V), tj. 16 l/kg MW.

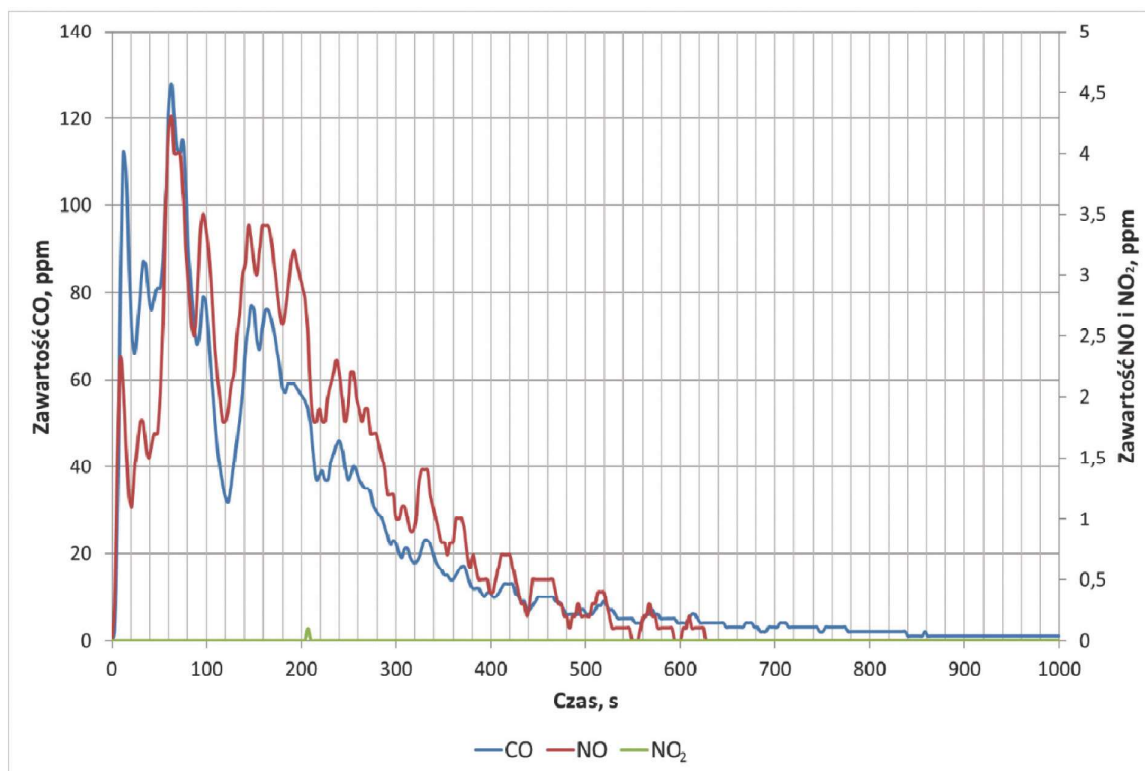






Rys. 10. Szacunkowe głębokości otworów wydrążonych za pomocą głowicy PG-7M w zależności od gęstości wybranych materiałów skalnych

Fig. 10. Estimated values of holes depth drilled by PG-7M warhead depending on the density of the selected



Rys. 11. Wartości szkodliwych produktów pochodzących z detonacji głowicy PG-7M

Fig. 11. Values of harmful products generated as a result of the detonation of the PG-7M warhead



Wyniki podziemnych badań prowadzonych w Kopalni Doświadczalnej „Barbara” z wykorzystaniem głowicy PG-7M na blokach cementowych w stalowej obudowie pokazały, że jest możliwe uzyskanie otworów o geometrii zbliżonej do cylindrycznej i o długości ponad 1000 mm oraz o średnicy przekraczającej 40 mm przy wykorzystaniu metody wybuchowej. Uzyskane wymiary otworu umożliwią późniejsze wprowadzanie materiałów wybuchowych luzem lub nabożowanych, gdyż oprócz odpowiedniego przekroju otworu nie był on zasypany. Wskazuje to na możliwość zastosowania głowic kumulacyjnych o wkładkach miedzianych do wykonywania otworów w polskim górnictwie. Wkładka kumulacyjna do nowo opracowywanego ładunku może być więc wzorowana na przykładzie głowicy kumulacyjnej PG-7M. Wskazana jest jednakże jej modyfikacja w celu uzyskania dłuższych otworów – rzędu 1500 ÷ 2500 mm.

Metoda badań zaprezentowana w niniejszym artykule powinna być zastosowana do testowania kolejnych typów głowic kumulacyjnych, dzięki czemu możliwe będzie ich porównanie.

Badania gazów postrzałowych w podziemnym chodniku doświadczalnym pokazały, że głównym produktem szkodliwym jest tlenek węgla. Wskazane jest w kolejnych próbach określenie czy dla badanego materiału wybuchowego jest możliwe spełnienie polskich przepisów określających maksymalny poziom 27 l generowanego CO z 1 kg materiału wybuchowego (badania należy wykonać w specjalnej komorze badawczej).

*Treść artykułu oparto na wynikach projektu pt. „Materiały o strukturze nanokrystalicznej i amorficznej do konstrukcji wkładek kumulacyjnych do zastosowania w przemyśle wydobywczym” (akronim NMATDRILL) o nr umowy TECHMATSTRATEG1/349156/13/NCBR/2017 w ramach Programu „Nowoczesne technologie materiałowe” TECHMATSTRATEG.*

*Składamy serdeczne podziękowania dla całego zespołu prowadzącego prace w zakresie projektu o akronimie NMATDRILL.*

## Literatura

- BURIAN W., MAGIER M., ROTKEGEL M., SOBALA J., SZYMAŁA J., ŻAK A. 2016 - Badania możliwości otworowania z wykorzystaniem ładunków kumulacyjnych. „Przeгляд Górnicy” nr 7, s. 20-25.
- GALIŃSKI C. 2002 - Zasady działania podstawowych typów pocisków przeciwpancernych. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe. Tom 15, nr 1, s. 1-10.
- JOHNSON W. 1972 - Impact strength of materials. Edward Arnold, Londyn. s. 303.
- LI Q.M. 2011 - Johnson's damage number in impact dynamics. International Journal of Impact Engineering T. 38(5), s. 273.
- MAGIER M., BURIAN W., ROTKEGEL M., SZYMAŁA J. 2016 - Experimental Analysis of the Concrete Penetration by Using Warheads from Demobilized Ammunition. Key Engineering Materials. Vol. 715, s. 243-248.
- PACK D.C., EVANS W. M.: 1950 - Penetration by high-velocity (Munroe) jets.: I, Proceedings of the physical society., Londyn., 1950, Nr B64, s. 289.
- RAWICKI Z., KRZEŁOWSKI J., MIREK A. 2017 - Bezpieczeństwo robót strzałowych w podziemnych zakładach górniczych w kontekście nieprawidłowości przy ich wykonywaniu stwierdzonych przez organy nadzoru górnictwa. „Przeгляд Górnicy” nr 3, s. 50-57.
- WALTERS W.P., ZUKAS J.A. 1989 - Fundamentals of shaped charges. John Wiley and Sons, New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore.
- WILK Z., ZYGMUNT B. 2007 - Zastosowanie ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych. Biuletyn WAT. Tom 14, nr 1, s. 245-258.
- ZAWADZKA-MAŁOTA I. 2009 - Wpływ struktury i składu górnictwa materiałów wybuchowych na zawartość toksycznych składników w gazach postrzałowych. Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko” nr 3, s. 113-130.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2019

Artykuł akceptowano do druku – 7.07. 2019



**LUBELSKI WĘGIEL**  
**„BOGDANKA”**  
 SPÓŁKA AKCYJNA

**KOPALNIA**  
 INTELIGENTNYCH  
 ROZWIĄZAŃ

jesteśmy notowani w indeksach:  
 mWIG40, WIG-GÓRNICTWO, InvestorMS oraz Respect Index

www.lw.com.pl