



**EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA METODY WYKONYWANIA
OTWORÓW STRZAŁOWYCH TECHNOLOGIĄ WYBUCHOWĄ
Z ZASTOSOWANIEM GŁOWIC KUMULACYJNYCH
W WARUNKACH PODZIEMNYCH**

***EXPERIMENTAL VERIFICATION OF SHOTHOLES PREPARATION
TECHNIQUE BY SHAPED CHARGE HEADS BLASTING
FOR UNDERGROUND MINING***

Mariusz MAGIER, Mariusz ZIELENKIEWICZ

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyński St., 05-220 Zielonka, Poland
Robert HILDEBRANDT, Mateusz PYTLIK, Jacek SOBALA, Michał SZASTOK

Główny Instytut Górnictwa / *Central Mining Institute*
Wojciech BURIAN, Joanna KULASA, Barbara JUSZCZYK
Instytut Metali Nieżelaznych / *Institute of Non Ferrous Metals*
Jacek JANISZEWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna / *Military University of Technology*
Jerzy LACHMAJER Nitro-Chem S.A.

Author's e-mail address: magierm@witu.mil.pl

DOI 10.5604/01.3001.0013.1671

Streszczenie: Głównym sposobem urabiania skał w górnictwie podziemnym i odkrywkowym jest wykorzystanie materiałów wybuchowych. 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. Wyeliminowanie procesu wiercenia poprzez zastosowanie ładunków kumulacyjnych może znacząco wpływać na zwiększenie postępów drażenia. Niniejsza praca ma na celu określenie możliwości wykonywania otworów strzałowych wykorzystując głowice kumulacyjne amunicji przeciwpancernej. 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.

Słowa kluczowe: ładunki kumulacyjne, otwory strzałowe, urabianie

Abstract: Use of explosives constitutes a primary method of rock extraction in underground and surface mining. The optimal method of rock extraction in this case is the insertion of a blasting charge into a blasthole. Process of blasthole drilling is the most time-consuming operation comparing to loading and detonation of explosives. Additionally, technical factors may render the drilling of blastholes difficult or impossible. Elimination of the drilling process through application of shaped charges could significantly increase the advancement of face mining. The purpose of this article is to determine possibilities for preparing blastholes through the application of shaped charge warheads of anti-tank ammunition. Results of conducted tests will be used to develop, produce and implement a new type of shaped charges for mining purposes, which in the future will increase the mining efficiency at keeping the costs down or by lowering them.

Keywords: shaped charges, blast holes, mining

1. Wprowadzenie

Jednym z głównych sposobów urabiania skał w górnictwie podziemnym jak i odkrywkowym, jest urabianie za pomocą materiałów wybuchowych. Stosowane jest w przypadkach, gdy nie ma możliwości prowadzenia urabiania maszynowego lub ręcznego, najczęściej ze względu na zbyt dużą zwięzłość skał. Polega ono na odwierceniu odpowiednio rozmieszczonych otworów strzałowych, załadowaniu ich materiałem wybuchowym, uzbrojeniu w zapalniki, wykonaniu przybitki, połączeniu przewodami elektrycznymi zapalników z zapalarką i odpaleniu ładunków za pomocą zapalarki elektrycznej. Do wiercenia otworów strzałowych stosuje się, oprócz wiertarek (elektrycznych, pneumatycznych lub hydraulicznych), wiertnice oraz wozy wiertnicze. Ze względu na ilość otworów strzałowych oraz dużą zwięzłość urabianych skał pomimo zastosowania powyżej wymienionych urządzeń wiercenie otworów strzałowych jest najdłuższym procesem w urabianiu za pomocą materiałów wybuchowych. W górnictwie zużywa się większość (około 98%) materiałów wybuchowych do użytku cywilnego. Zużycie materiałów wybuchowych w polskim górnictwie rocznie wynosi około 41 mln kg, a zużycie zapalników około 11 mln szt. [1]. Proces urabiania może być przyspieszony poprzez zastosowanie ładunków kumulacyjnych zamiast wiercenia.

Prowadzone prace w ramach projektu badawczego kr. TECHMATSTRATEG mają na celu dostosowanie i opracowanie nowych ładunków kumulacyjnych dla górnictwa, aby poprzez ich zastosowanie zwiększyć efektywność wydobywania, obniżyć jego koszty oraz wprowadzić nowe możliwości techniczne wykonywania otworów strzałowych metodą wybuchową [2, 3].

2. Dobór głowic kumulacyjnych do badań penetracji w warunkach podziemnych

Głowice kumulacyjne mogą być stosowane w zakładach górnictwa podziemnego nie węglowego, odkrywkowego i otworowego. Głowice kumulacyjne nie mogą być używane w warunkach zagrożenia wybuchem pyłu wę-

1. Introduction

The mining of rocks by explosives is one of the main techniques deployed in surface and underground mining industry. This is mostly used when mechanized or manual ways of mining cannot be deployed because of excessive conciseness of rocks. It is based on drilling a system of shotholes and filling them with explosive material and arming them with exploders, and making the tamps, preparing wire connections between exploders and a detonator, and firing the shots by an electric detonator. The blastholes are made by electric, pneumatic or hydraulic drills or by stationary or moving boring machines. Even if the above mentioned machines are used, the drilling of shotholes takes the gross of time at the explosive mining because of a large number of drilled shotholes and high conciseness of exploited rocks. The mining industry uses a greater portion of civilian designated explosives (ca. 98%). The Polish mining industry uses annually ca. 41 million kg of explosives and ca. 11 million items of exploders [1]. The advancement of the face mining may be increased when the process of mechanical drilling is replaced by deployment of shaped charges.

The work conducted under research project coded TECHMATSTRATEG is aimed to adapt and develop new shaped charges for mining in order to boost efficiency and reduce costs of the mining, and implement new technical capacities for making the shotholes by blasting methods [2, 3].

2. Selection of Shaped Charge Warheads for Penetration Tests at Underground Conditions

Shaped charge warheads may be used by underground no-coal mines and by surface and tunnel mines. The shaped charge warheads cannot be used if there is a risk of methane or coal dust explo-

głowego i/lub metanu. Do inicjowania głowic kumulacyjnych zastosowano pobudzacze Pb-1 oraz zapalniki ERG.

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 [4]:

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

gdzie ρ_s i ρ_c opisują gęstość materiału strumienia i celu, L – długość penetratora, tj. skumulowana długość strumienia kumulacyjnego, Y – dynamiczną granicę plastyczności materiału celu, V – prędkość penetratora (strumienia). Współczynnik proporcjonalności (α) można odnieść do kryterium zniszczenia materiału Johnson'a [5].

Celem możliwie maksymalnego ograniczenia ilości odłamków propagowanych z korpusu pocisków zawierających głowice kumulacyjne, które mogłyby w warunkach podziemnej detonacji doprowadzić do uszkodzenia istotnych elementów instalacji, a także na podstawie wyników badań wykonanych w ubiegłych latach [3], dokonano selekcji dostępnych głowic kumulacyjnych do zastosowań wojskowych. Poniżej przedstawiono podstawowe parametry wybranych do badań głowic:

1. Głowica kumulacyjna PG-7W:
 - a. materiał wybuchowy: A-IX-1,
 - b. masa materiału wybuchowego: 0,55 kg,
 - c. materiał obudowy głowicy: stop aluminium (dural).

sion. The used shaped charge warheads were detonated by igniters Pb-1 and fuses ERG.

The most essential question in designs of shaped charges is a suitable selection of material for making a shaped charge liner as it directly affects the penetration depth (P) through a specific material that is given by dependence [4]:

where ρ_s and ρ_c describe the densities of the material for the jet and the target, L – the length of penetrator i.e. the aggregated length of cumulative jet, Y – the dynamic limit of plasticity for the target material, V – the velocity of the penetrator (jet). The ratio of proportion (α) may be referred to Johnson's criterion of material destruction [5].

On the base of investigations performed in the past [3] a selection of available military shaped charge warheads was made to use such ones which produce minimal number of fragments, originating from the bodies of projectiles encasing the shaped charge warheads, that would damage essential parts of installations in conditions of the underground blast. Basic characteristics of warheads taken for tests are presented below:

1. Shaped charge warhead PG-7W:
 - a. Explosive material: A-IX-1,
 - b. Weight of explosive material: 0.55 kg,
 - c. Warhead encasing material: aluminium alloy (duralumin).



Rys. 1. Głowica kumulacyjna PG-7W (WITU)

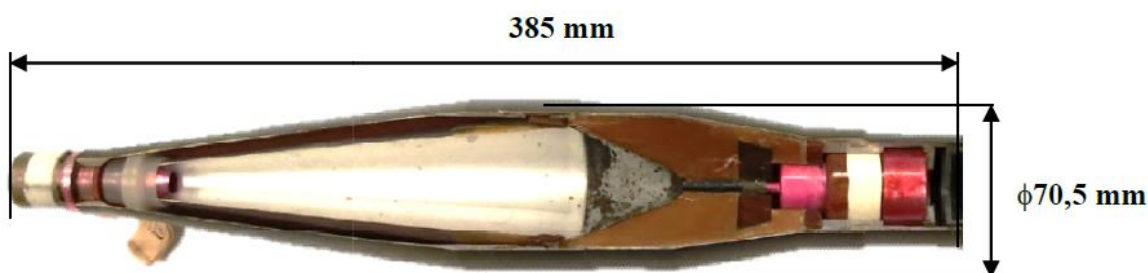
Fig. 1. Shaped charge warhead PG-7W (MIAT)

2. Głowica kumulacyjna PG-7 WM

- a) materiał wybuchowy: A-IX-1,
- b) masa materiału wybuchowego: 0,55 kg,
- c) materiał obudowy głowicy: stop aluminium (dural).

2. Shaped charge warhead PG7 WM

- a) Explosive material: A-IX-1,
- b) Weight of explosive: 0.55 kg,
- c) Warhead encasing material: aluminium alloy (duralumin).



Rys. 2. Głowica kumulacyjna PG-7WM (WITU)

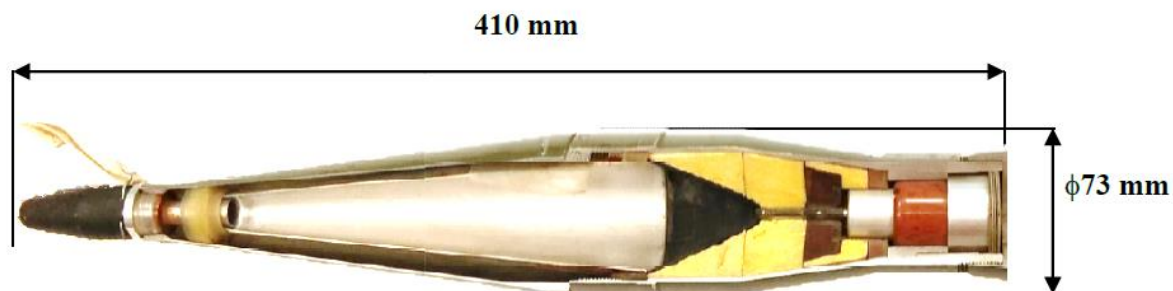
Fig. 2. Shaped charge warhead PG-7WM (MIAT)

3. Głowica kumulacyjna PG-9

- a) materiał wybuchowy: okfoł lub A-IX-1,
- b) masa materiału wybuchowego: 0,34 kg,
- c) materiał obudowy głowicy: stop aluminium (dural).

3. Shaped charge warhead PG-9

- a. Explosive material: okfoł or A-IX-1,
- b. Weight of explosive: 0.34 kg,
- c. Warhead encasing material: aluminium alloy (duralumin).



Rys. 3. Głowica kumulacyjna PG-9 (WITU)

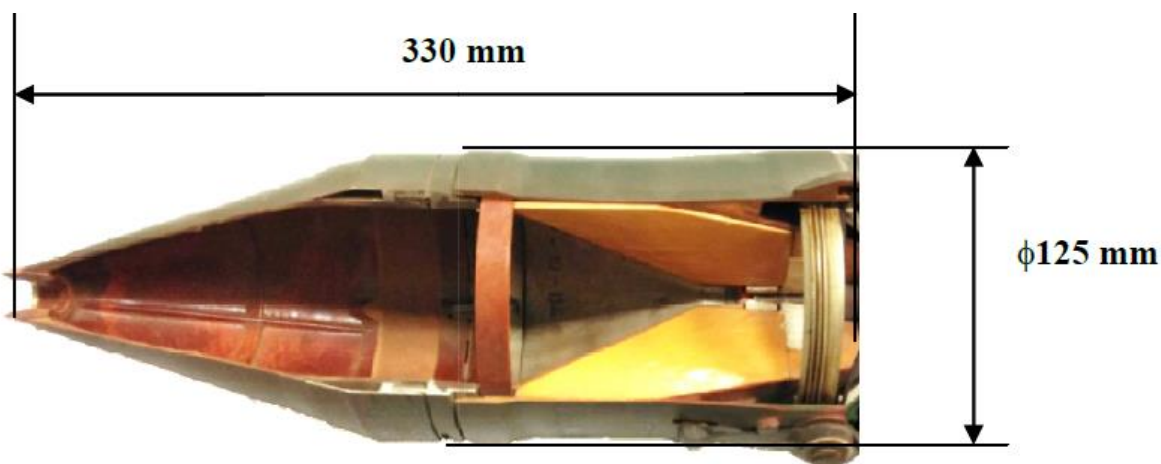
Fig. 3. Shaped charge warhead PG-9 (MIAT)

4. Głowica kumulacyjna 9M14

- a) materiał wybuchowy: okfoł lub A-IX-1,
- b) masa materiału wybuchowego: 1,8 kg,
- c) materiał obudowy głowicy: tworzywo sztuczne.

4. Shaped charge warhead PG-9

- a) Explosive material: okfol or A-IX-1,
- b) Weight of explosive: 0.34 kg,
- c) Warhead encasing material: aluminium alloy (duralumin).



Rys. 4. Głowica kumulacyjna 9M14 (WITU)

Fig. 4. Shaped charge warhead 9M14 (MIAT)

3. Badania dynamiczne w kopalni doświadczalnej „Barbara”

Jako obiekty badawcze użyto 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 pękanie, w rurach umieszczono pręty zbrojeniowe (rys. 5). W trakcie wykonywania bloków cementowych odlano także próbki, dla których oznaczano wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, gęstość objętościową i rzeczywistą (tabela 1).

3. Dynamic Tests in “Barbara” Experimental Mine

The blocks of reinforced concrete (6 reinforcing rods) were used for testing. Cement mortar 2PCM20 with the plasticiser was used to fill up double-wall pipes made of vinyl polychloride with the length of 1450 mm and internal diameter of 500 mm and external diameter of 569 mm. The reinforcing rods were placed in the pipes to increase the resistance of the block against breaking (Fig. 5). During the preparation of cement blocks some testing samples were also cast to identify their resistance to one-axis compression, and the volume and real densities (Table 1).

Tabela 1

Próbka	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c [MPa]	Gęstość objętościowa ρ_o [kg/m ³]	Gęstość rzeczywista ρ_r [kg/m ³]
Nr 1	15,3	1974	2555
Nr 2	13,5	1954	2567
Średnia wartość	14,4	1964	2561

Table 1

Sample	Resistance to one-axis compression R_c [MPa]	Volume density ρ_o [kg/m ³]	Real density ρ_r [kg/m ³]
Nr 1	15,3	1974	2555
Nr 2	13,5	1954	2567
Average value	14,4	1964	2561



Rys. 5. Przygotowane bloki cementowe w osłonie z prętami zbrojonymi (fot. GIG)

Fig. 5. Concrete blocks prepared in casings with reinforcing rods (Photo GIG)

Tak przygotowane bloki umieszczono w chodniku doświadczalnym Kopalni Doświadczalnej „Barbara” na poziomie 30 m. Bloki ustawiono w pozycji poziomej na spągu wyrobiska, zaś głowice kumulacyjne PG-7WM były przykładane do powierzchni czołowej bloku jak najbliżej jego osi wzdłużnej i pozycjonowane za pomocą podsypki piaskowej. Dodatkowo stosowano osłony stalowe, celem zapobieżenia uszkodzeniom instalacji znajdujących się w chodniku przez odłamki z eksplodujących głowic (rys. 6).

W wyniku przeprowadzonych pierwszych testów stwierdzono niedostateczne zabezpieczenie bloku cementowego przed jego rozkruszeniem. Niezbędnym stało się zastosowanie dodatkowej specjalnej osłony, zapobiegającej kruszeniu się bloku w trakcie jego penetracji strumieniem kumulacyjnym. W tym celu skonstruowano specjalną osłonę, do której wprowadzono przygotowane wcześniej bloki cementowe.

Prepared blocks were set in an experimental level of the Experimental Mine “Barbara” placed 30 m below the surface. The blocks were set in the horizontal position on the floor of the mining face, and the shaped charge warheads PG-7WM were applied at the frontal part of block, close to its main axis, and were positioned by sand foundation. Steel screens were added to prevent any damages of installations, existing within the working line, caused by fragments of blasting warheads (Fig. 6).

The first tests have proved that the concrete block was not well protected against breaking. It was necessary to use a special additional screening to prevent the breaking of the block during its penetration by the cumulative jet. For this reason a special screen was designed to accommodate the earlier prepared concrete block.



Rys. 6. Przygotowane stanowisko badawcze z osłonami stalowymi
(fot. M. Magier)

Fig. 6. Testing set-up protected by steel screens
(Photo M. Magier)

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 (rys. 7).

It is made of a steel cylinder with 8 mm wall thickness and 708 mm external diameter.

The concrete block was additionally protected by the fine sand introduced between the walls of vinyl polychloride and steel cylinders and wetted by water to increase its density (Fig. 7).



Rys. 7. Widok bloku cementowego w obudowie stalowej z przyłożoną głowicą kumulacyjną
(po lewej) oraz jego powierzchni czołowej po detonacji ładunku kumulacyjnego (fot. GIG)

Fig. 7. View of the concrete block within a steel casing with the shaped charge warhead attached
(on the left) and its frontal surface after the shaped charge blasting (Photo GIG)

Po strzeleniu głowicą PG-7WM stwierdzono niewielkie spękania bloku, a powstały w nim otwór miał głębokość ok. 1100 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.

After PG-7WM warhead blasting it was noticed that there were some breaks in the block and a hole of ca. 1100 mm depth. The concrete block was taken out from the steel casing and cut through in order to study the profile of the hole and to make the measurements (Fig. 8).

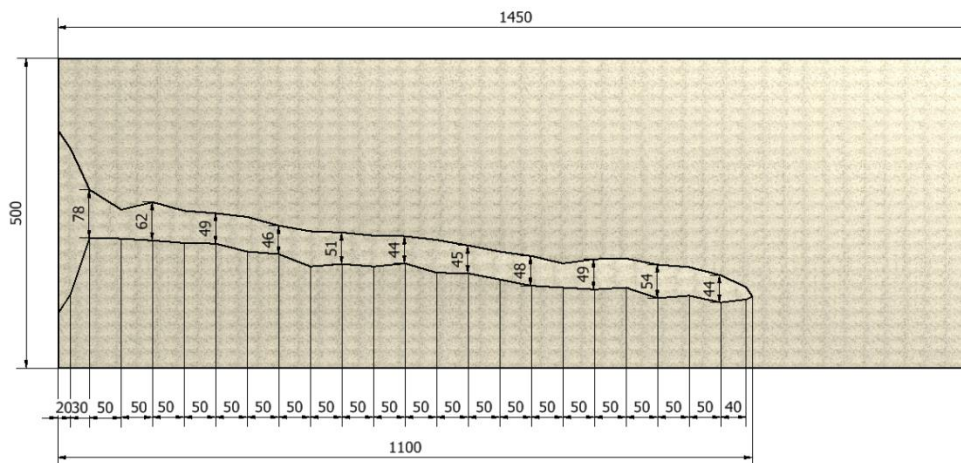


Rys. 8. Blok cementowy po rozcięciu (fot. GIG)

Fig. 8. Concrete block after cutting through (Photo GIG)

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.

Results of measurements are shown in figure 9. Basing on this it may be stated that the diameter of the hole is between ca. 44 mm to 62 mm on its length of ca. 950 mm (excepting the inlet and terminating parts).

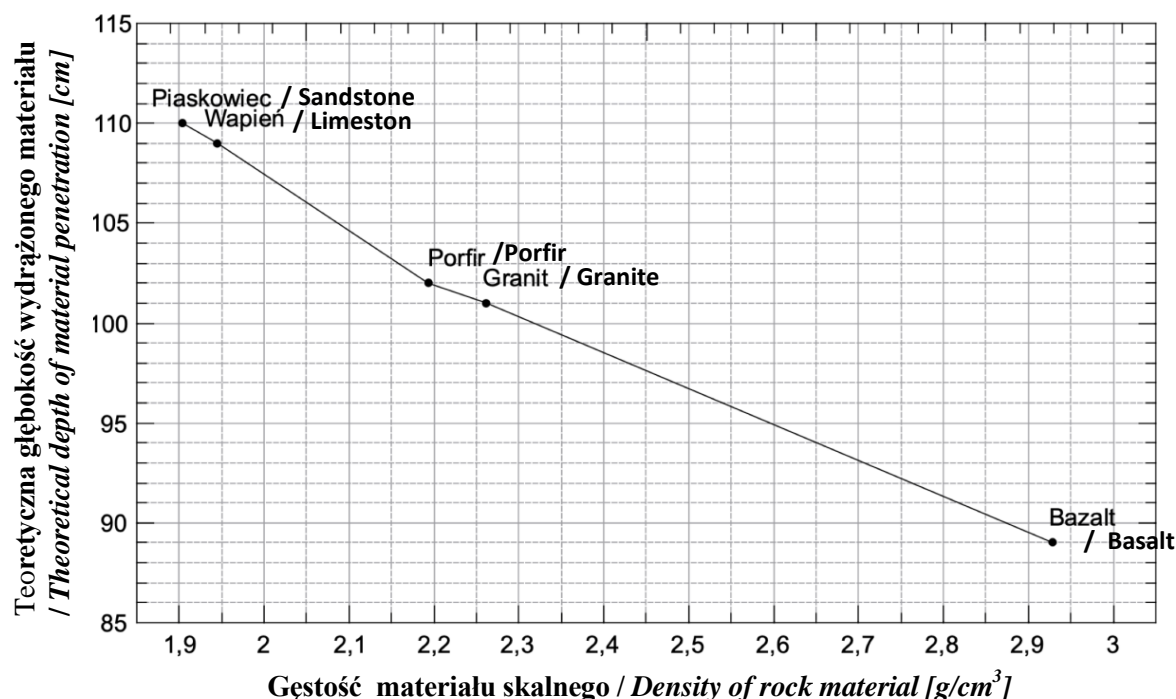


Rys. 9. Przekrój bloku cementowego po próbie badawczej (GIG)

Fig. 9. Cross section of the concrete block after the testing trial (GIG)

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-7WM. Obliczona w ten sposób długość strumienia wyniosła 510 mm. Wartość tą przyjęto jako podstawę do oszacowania możliwej do osiągnięcia głębokości, drążonych przez ładunek PG-7WM, 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.

The dependence (1) and the measured depth of the hole produced within the concrete block were used to estimate roughly (without considering the terms connected with mechanical properties) the aggregated length of the cumulative jet generated by PG-7WM shaped charge. The length of the jet received in this way was 510 mm. This value was taken as a base for estimating the depths of holes produced by PG-7WM charge within the material of rocks of different densities. Results of estimations of penetration depths for different materials of rocks are shown in Fig. 10. The received results show that even if a shaped charge designed for the military purposes is used, it is still possible to get the holes of significant depths.



Rys. 10. Szacunkowe głębokości otworów wydrążonych za pomocą głowicy PG-7WM zależności od gęstości wybranych materiałów skalnych (GIG)

Fig. 10. Estimated depths of holes produced by PG-7WM warhead depending on the densities of selected material of rocks (GIG)

Dodatkowo wykonano badanie w celu określenia skutków jednoczesnego odpalenia dwóch głowic PG-7WM umieszczonych w odległości około 50-60 cm od siebie (rys. 11).

An additional test was carried out to check the effects of simultaneous detonation of two PG-7WM warheads placed at distance of ca. 50-60 cm from each other

W wyniku jednoczesnej inicjacji obu głowic nie stwierdzono wzajemnego negatywnego oddziaływania skutków detonacji głowic, a powstałe w skale ściany tunelu krateru po strumieniach kumulacyjnych, charakteryzowały się regularnym kształtem.

(Fig. 11). It was stated that simultaneous detonation of two warheads does not cause any negative mutual interaction of detonation effects and the walls of the craters produced by the cumulative jets are characterised by regular shapes.



Rys. 11. Widok ściany i dwóch głowic kumulacyjnych PG-7WM przygotowanych do jednoczesnego odpalenia (fot. M. Magier)

Fig. 11. View of the mining face and two shaped charge warheads PG-7WM prepared for simultaneous detonation (Photo M. Magier)

4. Podsumowanie

Wyniki badań prowadzonych na poziomie 30 m Kopalni Doświadczalnej „Barbara” z wykorzystaniem głowicy PG-7WM na blokach cementowych w stalowej obudowie dowiodły, że możliwe jest uzyskanie otworów o geometrii zbliżonej do cylindrycznej i o długości ponad 1000 mm oraz o średnicy przekraczającej 40 mm przy wykorzystaniu metody drążenia strumieniem kumulacyjnym. Uzyskane wymiary otworu umożliwią późniejsze wprowadzanie materiałów wybuchowych luzem lub „naborowanych”, gdyż oprócz odpowiedniego przekroju otwór nie był zasypywany resztkami penetrowanego materiału. Wskazuje to na możliwość zastosowania głowic kumulacyjnych do drążenia otworów w polskich kopalniach. Wkładka kumulacyjna do nowo opracowywanego ładunku może być wzorowana na głowicy kumulacyjnej PG-7WM. Wskazana jest jedna-

4. Summary

Results of tests carried out on the level of 30 m in the Experimental Mine „Barbara” with the use of PG-7WM warheads applied to concrete blocks kept in steel casing have proved that the cumulative jet method may be used to bore the holes with the length above 1000 mm of quasi-cylindrical geometry and diameter above 40 mm. The dimensions of received holes enable the introduction of explosive materials applied both in bulk or “in-bored” as a produced hole has a suitable diameter without any remaining fragments of penetrated material left inside. It indicates that there is a chance to use the shaped charge warheads to bore the holes in the Polish mines. The cumulative liner for a newly developed charge may be similar to PG-7WM shaped charge warhead. But it seems reasonable to make an upgrading

kże jej modyfikacja w celu uzyskania dłuższych otworów – rzędu 1500 ÷ 2500 mm.

Metoda badań zaprezentowana w niniejszym artykule będzie zastosowana do testowania kolejnych typów głowic kumulacyjnych. Rezultaty dalszych prac będą zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

for getting longer holes – up to 1500 ÷ 2500 mm.

Testing method described in the paper will be used for testing successive types of shaped charge heads. The results of the work will be presented in following publications.

Treść artykułu oparto o wyniki projektu pt. „Materiały o strukturze nanokrystalicznej i amorficznej do konstrukcji wkładek kumulacyjnych do zastosowania w przemyśle wydobywczym” (akronim NMATDRILL), nr umowy TECHMATSTRATEG 1/349156/13/NCBR/2017 w ramach Programu „Nowoczesne technologie materiałowe” TECHMATSTRATEG.

The paper was prepared on the base of project „Materials of Nanocrystal and Amorphous Structure for Designs of Cumulative Liners Dedicated to Mining Industry” (Acronym NMATDRILL), Agreement No TECHMATSTRATEG 1/349156/13/NCBR/2017 in the frame of Program „Modern Material Technologies” TECHMATSTRATEG.

Literatura / Literature

- [1] Rawicki Z., Krzelowski J., Mirek A.: Bezpieczeństwo robót strzałowych w podziemnych zakładach górniczych w kontekście nieprawidłowości przy ich wykonywaniu stwierdzonych przez organy nadzoru górniczego. Przegląd Górniczy. Nr 3/2017, str. 50-57, 2017.
- [2] Burian W., Magier M., Rotkegel M., Sobala J., Szymała J., Żak A. : Badania możliwości otworowania z wykorzystaniem ładunków kumulacyjnych. Przegląd Górniczy. Nr 7/2016, str. 20-25, 2016.
- [3] Magier M., Burian W., Rotkegel M., Szymała J.: Experimental Analysis of the Concrete Penetration by Using Warheads from Demobilized Ammunition. Key Engineering Materials. Vol. 715, str. 243-248, 2016.
- [4] Pack D.C., Evans W. M.: Penetration by High-Velocity (Munroe) jets.: I, Proceedings of the Physical Society, London, Nr B64, str. 289, 1950.
- [5] Johnson W.: Impact Strength of Materials. Edward Arnold, London. Str. 303, 1972.

