

Badania możliwości otworowania z wykorzystaniem ładunków kumulacyjnych

Research on a possibility to conduct punching with a use of shaped charges



*Dr Wojciech Burian**



*Pplk dr hab. inż. Mariusz Magier**)*



*Dr inż. Marek Rotkegel***)*



*Dr inż. Jacek Sobala***)*



*Dr inż. Jan Szymala***)*



Dr inż. Artur Żak)*

Treść: W artykule przedstawiono przebieg i wyniki badań penetracji betonu przez ładunki kumulacyjne stosowane w przemyśle zbrojeniowym. Badania te stanowią pierwszy etap prac badawczych prowadzonych w kierunku rozpoznania możliwości stosowania ładunków kumulacyjnych do otworowania skał. Badania prowadzono na poligonie Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia z wykorzystaniem amunicji czołgowej. Prezentowane w artykule badania i wyniki pozwalają wnioskować o możliwości stosowania ładunków kumulacyjnych do otworowania skał w przemyśle wydobywczym.

Abstract: This paper presents the course and results of concrete penetration tests conducted with shaped charges used in the arms industry. These tests are the first stage of research focused on the possible use of shaped charges for rock punching. The study was conducted at the training ground of the Military Institute of Armament Technology with the use of tank ammunition. The tests and results presented in the paper allow to conclude that there is a possibility to use shaped charges for rock punching in the mining industry.

Słowa kluczowe:

ładunki kumulacyjne, otworowanie, urabianie

Key words:

shaped charges, punching, mining

*) Instytut Metalurgii Żelaza, **) Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ***) Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

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 [11]. Do wiercenia otworów strzałowych stosuje się oprócz wiertarek (elektrycznych, pneumatycznych lub hydraulicznych), wiertnice oraz wozy wiertnicze. Ze względu na liczbę otworów strzałowych oraz dużą zwięzłość urabianych skał pomimo zastosowania wymienionych urządzeń wiercenie otworów strzałowych jest najdłuższym trwającym procesem w urabianiu za pomocą materiałów wybuchowych. Jego skrócenie polegające na wyeliminowaniu wiercenia poprzez zastosowanie ładunków kumulacyjnych może skutkować zwiększeniem postępów drążenia.

Wobec powyższego autorzy artykułu rozpoczęli badania mające na celu określenie możliwości wykonywania otworów strzałowych (otworowania) za pomocą ładunków kumulacyjnych, które opisano poniżej.

2. Zjawisko kumulacji

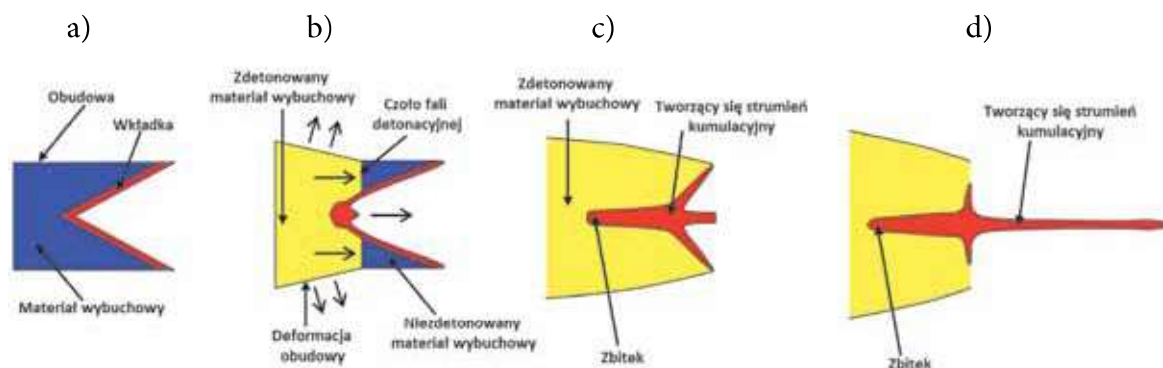
Mechanizm formowania się strumienia kumulacyjnego jest znany od początków XX wieku i został teoretycznie opisany [12]. Typowa głowica kumulacyjna składa się z materiału wybuchowego i wkładki z jednej strony i detonatora z drugiej. Wkładka ma zazwyczaj kształt stożkowy ale może być również kształtu półkolistego lub innego. Wkładki wykonywane są z różnych materiałów takich jak miedź, cyrkon, stal [2, 3, 10]. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat przekroju głowicy kumulacyjnej oraz poszczególne fazy procesu tworzenia strumienia kumulacyjnego. Podczas detonacji, fala detonacyjna przesuwa się z lewej do prawej strony materiału wybuchowego (patrz rys. 1 (B)) z prędkością około 6-7 km/s

i generuje ciśnienie około 3×10^{10} Pa, co powoduje spęcenie obudowy głowicy i w konsekwencji jej fragmentację [6].

Zazwyczaj, czas potrzebny na przejście fali detonacyjnej do wierzchołka stożka wkładki wynosi około 6 μ s. Bardzo wysokie ciśnienie powstałe po detonacji materiału wybuchowego prowadzi do gwałtownego odkształcenia wkładki w kierunku jej osi, proces ten zazwyczaj określa się jako zapadanie. Symetria wkładki powoduje, że po osiągnięciu osi symetrii przeciwległych części wkładki, pozostaje tylko niezerowa wartość pędu w kierunku osi symetrii. Geometria wkładki musi umożliwiać ogniskowanie pędu, po jej odkształceniu w trakcie detonacji, w kierunku osi symetrii wkładki. W trakcie detonacji formują się dwa strumienie, posiadające prędkość względem osi symetrii wkładki. Jeden (główny) strumień poruszający się z prędkością 6-15 km/s w kierunku celu, który na skutek ciśnienia wywołanego detonacją znacznie przekraczającego granicę plastyczności przybiera formę ciekłą o dużej zdolności penetracyjnej. Drugi strumień, zwany zbitkiem, porusza się w z prędkością do 1 km/s. Przy stosowaniu wkładek stożkowych, większość materiału wkładki tworzy zbitkę (rys. 1). Główny strumień jest w dalszym ciągu rozciągany, do czasu osiągnięcia celu. Ważny jest zatem odpowiedni moment detonacji głowicy kumulacyjnej, aby strumień zdążył się uformować przed osiągnięciem celu w sposób zapewniający maksymalną penetrację. Około 50 μ s po detonacji, wkładka ma kształt mieczowy (rys. 1 (D)), zazwyczaj w tym momencie następuje kontakt z celem. Mechanizm penetracji materiału przez strumień kumulacyjny bazuje na płynięciu plastycznym penetrowanego materiału, ponieważ czynnikiem odpowiedzialnym za penetrację materiału jest energia kinetyczna strumienia.

Głowice kumulacyjne w ciągu ostatnich kilku dekad były stosowane głównie do celów wojskowych, jednakże ze względu na możliwości drążenia otworów, rozpoczęto ich stosowanie również w górnictwie, głównie naftowym i gazowym. Obecnie prowadzone są prace mające na celu dostosowanie i opracowanie nowych ładunków kumulacyjnych do górnictwa węgla kamiennego, brunatnego, miedziowego oraz do kamieniołomów, aby poprzez ich zastosowanie zwiększyć efektywność wydobywania oraz obniżyć jego koszty.

Ładunki kumulacyjne do zastosowań w górnictwie różnią się przede wszystkim konstrukcją wkładki, która musi zostać



Rys 1. Schematy przekroju poprzecznego głowicy kumulacyjnej przed detonacją oraz na poszczególnych etapach tworzenia się strumienia kumulacyjnego, (A) – głowica kumulacyjna przed detonacją; (B) – podczas detonacji, fala detonacyjna przechodzi przez materiał wybuchowy, następuje spęcenie obudowy oraz wkładka kumulacyjna zaczyna się zapadać, (C) – wkładka kumulacyjna zapada się w dalszym ciągu i następuje początek tworzenia się strumienia kumulacyjnego, (D) – po około 9 μ s po zapadnięciu się wkładki, strumień jest napędzany i rozciągany, profil strumienia ma kształt mieczowy

Fig. 1. Diagrams of cross-sections of the shaped charge head before detonation and at various stages of formation of a shaped charge jet, (A) – the shaped charge head before detonation; (B) - during detonation, detonation wave passes through the explosive, as a result the casing is expanded and the liner begins to collapse, (C) - the liner continues to collapse, after that, the shaped charge jet begins to form, (D) - after about 9 μ s, after the liner has collapsed, the jet is driven and stretched, the profile of the stream resembles a sword

dostosowana do drążenia otworów o wymaganych parametrach. W przeciwieństwie do zastosowań wojskowych, ładunki kumulacyjne do zastosowań w przemyśle wydobywczym muszą drążyć otwory o większych średnicach i jednorodnym przekroju poprzecznym, co jest konieczne ze względu na prowadzenie dalszych prac strzałowych. W przemyśle wydobywczym drążenie otworów odbywa się w skałach o zróżnicowanej gęstości i zawierających często nieciągłości w postaci szczelin co pociąga za sobą konieczność zaprojektowania wkładki kumulacyjnej, która umożliwi utworzenie strumienia drążącego otwory o długości około 2 m w środowisku, które sprzyja rozpraszaniu tego strumienia.

Zależność głębokości penetracji – P - strumienia kumulacyjnego od wytrzymałości penetrowanego ośrodka, opisuje następująca formuła wyprowadzona na bazie teorii hydrodynamicznej, która jest głównie stosowana do opisu zjawiska oddziaływania strumienia kumulacyjnego z materiałem [9]

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

gdzie:

- ρ_s i ρ_c – opisują gęstość materiału strumienia i celu,
- L – długość penetratora,
- Y – dynamiczna granica plastyczności celu,
- V – prędkość penetratora.

Współczynnik proporcjonalności można odnieść do kryterium zniszczenia materiału Johnsona [7, 8]

$$\frac{\alpha Y}{\rho_s V^2} = \frac{\alpha}{J_D} \quad (2)$$

gdzie: $J_D = \rho_s V^2$ oznacza kryterium zniszczenia materiału.

Zależność ta pokazuje, że właściwości wytrzymałościowe celu wpływają na głębokość penetracji strumienia kumulacyjnego. Na przykład, dla materiałów stalowych, współczynnik proporcjonalności wynosi 0,3, co oznacza, że głębokość penetracji strumienia kumulacyjnego może zostać zredukowana o 30% ze względu na parametry wytrzymałościowe penetrowanego materiału. Ponieważ głębokość penetracji – P - strumienia kumulacyjnego nie opisywała dobrze końcowego etapu oddziaływania strumienia kumulacyjnego z materiałem, w którym obniża się znacznie prędkość strumienia i stosunek wytrzymałości materiału do wytrzymałości strumienia odgrywa istotną rolę, Eichelberger [4] dodał dwie wielkości do modelu hydrodynamicznego, które oddają wpływ wytrzymałości na proces penetracji materiału przez strumień kumulacyjny. Allison i Vitalli [1] opracowali model przy zastosowaniu przybliżenia „rzeczywistego początku” (ang. *Virtual Origin – VO*), w którym głębokość penetracji – P - opisuje następujący wzór

$$P = Z \left[\left(\frac{V_{sk}}{V_{sp}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3)$$

gdzie:

- Z – oznacza efektywną długość strumienia mierzoną od rzeczywistego początku tworzenia się strumienia (VO) do powierzchni celu,
- V_{sk} i V_{sp} – są prędkościami początku i końca strumienia,
- γ – jest pierwiastkiem kwadratowym stosunku gęstości materiału celu i strumienia $\gamma = \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_s}}$.

W przypadku głębokości penetracji strumienia opisanej wzorem (2) nie zostały uwzględnione parametry wytrzymałościowe penetrowanego obiektu, co prowadzi do przeszacowania długości drążonego otworu. Badania przeprowadzone przy zastosowaniu ładunków kumulacyjnych do drążenia betonu [5] umożliwiły wprowadzenie poprawki do wzoru (3),

uwzględniając właściwości wytrzymałościowe drążonego materiału, zatem wzór (3) wygląda następująco:

$$P = Z \left[\left(\frac{V_{sk}}{V_{sp}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right] \left(1 - \frac{\lambda f_c'}{\rho_s V_{sp}^2} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- λ – jest współczynnikiem wyznaczanym doświadczalnie,
- f_c' – oznacza granicę plastyczności wyznaczaną w próbie ściskania.

Uwzględnienie parametrów wytrzymałościowych umożliwi teoretyczne obliczenie głębokości penetracji strumienia kumulacyjnego przy drążeniu otworów.

3. Badania poligonowe

Badania przeprowadzono w czerwcu i wrześniu 2015 roku na poligonie Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia w Zielonce koło Warszawy. Celem badań było sprawdzenie możliwości penetracji konstrukcji betonowej przez głowice kumulacyjne bojowej amunicji czołgowej. Badania przeprowadzono na stanowisku ogniowym „2500”, wykorzystując znajdujący się tam bunkier badawczy. Jako głowice bojowe zostały wykorzystane korpusy 125 mm kumulacyjnych pocisków czołgowych BK-14 przeznaczonych do strzelania z czołgów T-72 i PT-91 pozbawione zapalników. Odpalenia głowic bojowych dokonywano statycznie z wykorzystaniem zapalników elektrycznych i pobudzaczy dedykowanych do tego typu głowic. Na rysunku 2 przedstawiono głowicę bojową kumulacyjnego pocisku czołgowego BK-14.

Korpus pocisku wykonany jest ze stali wysokiej wytrzymałości, zapewniającej odpowiednią ochronę głowicy kumulacyjnej podczas strzału i napędzania pocisku w lufie armaty, kiedy oddziałują wysokie ciśnienia (300 MPa) i przyspieszenia (30 000 g). Zasadniczym elementem głowicy



Rys. 2. Głowica bojowa 125 mm kumulacyjnego pocisku czołgowego BK-14

Fig. 2. Warhead, 125 mm, of a HEAT BK-14 projectile

bojowej jest stożkowa wkładka wykonana ze spieku miedzi oraz materiał wybuchowy typu A-IX-1 lub flegmatyzowany woskiem oktogen o masie około 1,6 kg. Przebijalność głowicy w stosunku do stali pancernej typu RHA (*Rolled homogenous armour* – walcowana stal pancerna) wynosi 440 mm.

Przed przystąpieniem do właściwych prób przeprowadzono badania parametrów betonu, z którego wykonano bunkier. W tym celu metodą odwiertów rdzeniowych pobrano próbki, które następnie poddano badaniom w maszynie wytrzymałościowej. Określono wytrzymałość betonu na ściskanie oraz bardzo istotną w zjawisku kumulacji gęstość betonu. Na rysunku 3 pokazano sposób wykonywania odwiertu, otwór oraz rdzeń pobrany ze ściany bunkra, natomiast w tablicy 1 zestawiono wyniki badań wytrzymałościowych próbek, przeprowadzonych przez akredytowane laboratorium GIG. W wyniku przeprowadzonych prób potwierdzono wysokie parametry betonu zastosowanego do budowy bunkra.

W celu przeprowadzenia prób głowice przykładano do ściany bunkra z wykorzystaniem użytecznych skrzydł dREW-

nianych (rys. 4). Miejsce przyłożenia określano wykrywaczem metalu tak, aby strumień kumulacyjny nie trafił w pręty zbrojeniove. Na rysunku 4 przedstawiono głowicę bojową gotową do odpalenia.

W wyniku przeprowadzonych prób strzałowych otrzymano trzy otwory. Ich lokalizację przedstawiono na rysunku 5, natomiast na rysunku 6 – ich wloty. Niestety, pomimo stosowania wykrywacza metalu w przypadku otworu B natrafiono na zbrojenie.

Uzyskane otwory poddano pomiarom, profilowaniu oraz penetracji endoskopem otworowym. W efekcie prób uzyskano otwory o głębokościach powyżej 120 cm (otwory A i C) oraz około 50 cm (otwór B). Mniejsza głębokość otworu B wynikała z trafienia w pręty zbrojeniove znajdujące się poza zakresem wykrywacza. Natomiast przekroje poprzeczne otworów zbliżone są do okręgów, których średnice przy wlocie wynosiły około 50 mm i zmniejszały się stożkowo do dna. Na rysunku 7 przedstawiono profile otworów, a na rysunku 8 widok ścianek otworów.



Rys. 3. Sposób pobierania rdzenia, otwór oraz pobrany rdzeń
Fig. 3. Method of taking the core; the hole and obtained core

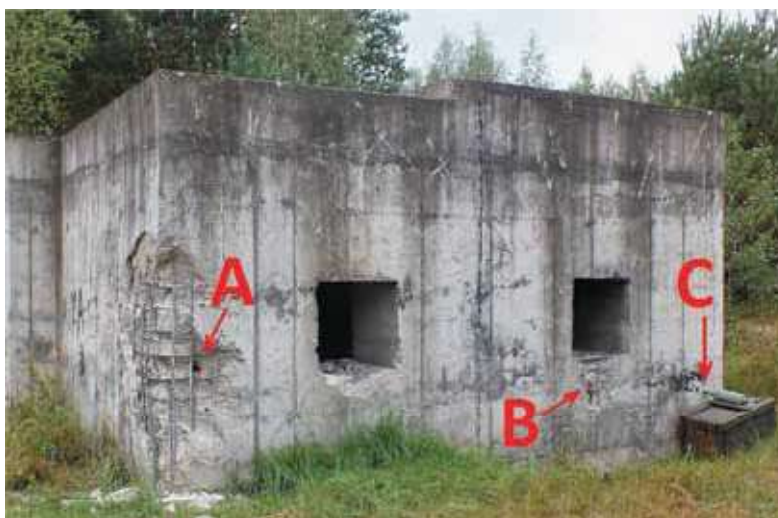
Tablica 1. Wyniki badań próbek betonu
Table 1. Results of concrete samples tests

Lp.	Materiał badawczy	Numer próbki laboratoryjnej	Wytrzymałość na ściskanie f_{cs} , MPa	Średnia wytrzymałość na ściskanie f_{cs} , MPa	Gęstość pn g/cm^3	Średnia gęstość pn g/cm^3
1	beton	1/1	37,9	39,1	2,25	2,282
	beton	1/2	28,9		2,29	
	beton	1/3	45,2		2,32	
	beton	1/4	42,2		2,23	
	beton	1/5	41,4		2,31	



Rys. 4. Głowica bojowa 125 mm kumulacyjnego pocisku czołgowego BK-14 wraz z wmontowanym detona-
torem oraz zapalnikiem elektrycznym gotowa do odpalenia

Fig. 4. Warhead, 125 mm, of a HEAT BK-14 projectile equipped with a built in detonator and electric fuse,
ready for detonation

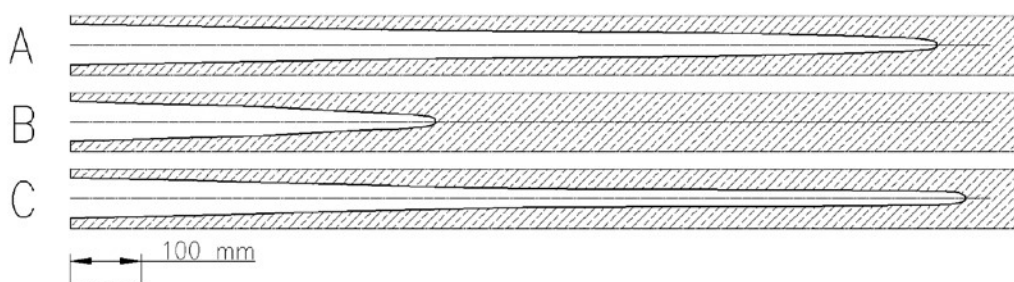


Rys. 5. Lokalizacja i oznaczenie otworów
Fig. 5. Location and marking of the holes



Rys. 6. Otwory uzyskane w wyniku prób (od lewej A, B, C)

Fig. 6. Holes obtained as a result of the tests (from left to right A, B, C)



Rys. 7. Profile podłużne otworów

Fig. 7. Longitudinal profiles of the holes



Rys. 8. Widoki wnętrza otworu
Fig. 8. View from the inside of the holes

4. Podsumowanie i wnioski

Wyniki wstępnych badań zastosowania ładunków kumulacyjnych do drażenia otworów strzałowych dały rezultat pozytywny. Stwierdzono, że użycie wkładek kumulacyjnych, stosowanych w ładunkach bojowych, wykonanych na bazie miedzi, umożliwia wydrążenie otworu o długości ponad 120 cm i jednorodnym kształcie. Próby te pokazały, że celowa jest kontynuacja badań zmierzających do opracowania ładunków kumulacyjnych umożliwiających drażenie otworów strzałowych o zadanych parametrach. Konieczne jest opracowanie wkładki o kształcie i rozmiarach pozwalających drażyć otwór o średnicy 40 mm i głębokości od 1,5 m do 2,0 m. Dalsze badania będą zmierzały również w kierunku doboru odpowiedniego ładunku formującego strumień kumulacyjny, aby możliwe było jego zastosowanie w warunkach środowiskowych panujących w krajowych przedsiębiorstwach wydobywczych.

Literatura

1. Allison F.E., Vitali R.A.: New method of computing penetration variables for shaped charge jets. Report No 1184. Ballistic Research Laboratory; 1963.
2. Bourne B., Cowan K.G., and Curtis J.P.: Shaped charge warheads containing low melt energy metal liners. Proc. 19th Int. Symp. Ballistics, Switzerland, 2001, s. 583–589.
3. Doig A.: Some metallurgical aspects of shaped charge liners. J. Battlefield Technology, t. 1, 1998, s.1–3.
4. Eichelberger R.: Experimental test of the theory of penetration by metallic jets. Journal of Applied Physics, t. 27 (1), 1956, s.63.
5. Elshenawy T., Li Q. M.: Influences of target strength and confinement on the penetration depth of an oil well perforator, International Journal of Impact Engineering, t. 54, 2013, s. 130.
6. Held M.: Liners for shaped charges. J. Battlefield Technology, t. 4(3), 2001, s.1–7.
7. Johnson W.: Impact strength of materials. London: Edward Arnold; 1972. s. 303.
8. Li Q.M.: Johnson's damage number in impact dynamics. International Journal of Impact Engineering, t. 38(5), 2011, s. 273.
9. Pack D.C., Evans W. M.: Penetration by high-velocity (Munroe) jets: I, Proceedings of the physical society, Londyn, 1950, Nr B64, s. 289.
10. Poole C.J., Ockendon J.R., Curtis J.P.: Gas leakage from fragmentation warheads. Proc. 20th Int. Symp. Ballistics, Florida, 2002, s. 113–117.
11. Turek M.: Podstawy podziemnej eksploatacji pokładów węgla kamiennego, Katowice 2010.
12. Walters W.P., Zukas J.A.: Fundamentals of Shaped Charges. John Wiley and Sons, 1989.