

## Badania porównawcze liniowych ładunków kumulacyjnych

### The comparative study of linear shaped charges

Łukasz Habera, Kamil Hebda

*Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Celem prezentowanych badań poligonowych była fizyczna weryfikacja zdolności liniowego ładunku kumulacyjnego (LŁK) do perforowania celu wielowarstwowego w warunkach napowietrznych. Zastosowane modele doświadczalne zbliżyły układ geometryczny testowany na poligonie do sekcji odwiertu podlegającej zabiegowi perforacji. Seria badań strzałowych obejmowała testy trzech rodzajów ładunków liniowych wytypowanych do stosowania w urządzeniach perforująco-szczelinujących. Testom poddano ładunek:

- LŁK w obudowie ołowiowej o przekroju kołowym  $\varphi = 40$  mm z wgłębieniem kumulacyjnym;
- LŁK z miedzianą wkładką kumulacyjną w obudowie stalowej w kształcie trapezu 20/30 mm;
- LŁK z wkładką kumulacyjną z litej miedzi w obudowie stalowej w kształcie trapezu 20/40 mm.

W trakcie badań rejestrowano prędkość strumienia kumulacyjnego za pomocą układu sond napięciowych rozmieszczonych pomiędzy poszczególnymi warstwami celu złożonego z materiału stalowego i betonu. Metoda badawcza dopasowana do charakteru testów miała na celu zweryfikowanie tezy, czy zaproponowane ładunki kumulacyjne spełniają warunki techniczne i sprawnościowe do efektywnego zastosowania ich w przemyśle naftowym. Poprzez warunki techniczne rozumiemy przede wszystkim gabaryt zewnętrzny umożliwiający posadowienie ładunku wewnątrz rury korpusowej z zachowaniem wymaganego dystansu od ścianki urządzenia. Przyjętym kryterium sprawnościowym była natomiast zdolność lub jej brak do perforowania celu wielowarstwowego w postaci dwóch płyt stalowych i odlewu betonowego. Stanowisko badawcze, z natury rzeczy jednorazowego użycia, każdorazowo składało się z bloczka betonowego o wymiarach 400 mm × 250 mm × 150 mm i wytrzymałości statycznej na ściskanie 20 MPa, na którym położone zostały równolegle dwie płyty stalowe z zachowaniem odstępu równego 20 mm. Grubość płyt to 5 mm i 10 mm. Na wierzchniej płycie stalowej pozycjonowano badany ładunek kumulacyjny w odległości jednego kalibru – czyli dystansu równego rozwarości ładunku trapezowego oraz pełnej średnicy ładunku o przekroju kołowym. Ponadto w płaszczyznach zmiany ośrodka (stal–powietrze; powietrze–stal; stal–beton) zamontowano zestaw napięciowych sond pomiarowych w postaci cienkich pojedynczych przewodów elektrycznych ( $\varphi = 0,25$  mm). W chwili ich zerwania (przerwanie obwodu) w wyniku działania strumienia kumulacyjnego – spadek napięcia w kolejnych sondach pomiarowych zadziała na zasadzie bramki logicznej typu start–stop lub innymi słowy: zero–jeden (0–1). Odczytanie czasów przerwań poszczególnych sond pozwoliło dodatkowo wyznaczyć prędkość strumienia kumulacyjnego i oszacować dynamikę jego wyhamowania wraz z pokonywaniem kolejnych elementów celu wielowarstwowego.

Słowa kluczowe: perfoszczelinowanie, kumulacja detonacyjna, ładunki liniowe.

**ABSTRACT:** The fireground tests are the best method for verifying the operation effectiveness of the entire shooting device or its component parts in real conditions. The purpose of the fireground tests presented herein was the physical verification of linear shaped charge (LSC) ability to perforate multi-layered target, reflecting the material and geometrical conditions of a borehole. The series of shooting tests included tests of three types of linear shaped charges selected for use in perfo-fracturing devices. The following shaped charges were tested:

- LSC in lead enclosure, having  $\varphi = 40$  mm circular cross-section with shaped recess;
- LSC with copper liner in 20/30 mm steel trapezoid enclosure;
- LSC with liner made of solid copper, in 20/40 mm steel trapezoidal enclosure.

During testing, the cumulative jet velocity was recorded using voltage type probes, arranged between the individual layers of a target composed of steel and concrete materials. The research method adapted for the project purposes was aimed at verification of the following thesis: whether the proposed shaped charges fulfil the technical and performance conditions for their effective application in the oil industry. The criterion adopted was the ability – or lack of ability – to perforate the multi-layered barrier in the form of two steel plates and concrete casting. The testing stand, single-use by its nature, was each time composed of concrete block having 400 mm × 250 mm × 150 mm dimensions and 20 MPa static compressive strength, on which two steel plates were placed parallel to each

Autor do korespondencji: Ł. Habera, e-mail: [lukasz.habera@inig.pl](mailto:lukasz.habera@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 21.01.2021 r. Zatwierdzono do druku: 24.05.2021 r.

other with 20 mm spacing. The thickness of the plates was 5 mm and 10 mm respectively. The tested shaped charge was placed on the top steel plate at a distance of one calibre – that is the distance equal to the opening of the trapezoidal shaped charge and full diameter of circular cross-section charge. Furthermore, within media interface planes (steel/air, air/steel; steel/concrete), the set of voltage-type measuring probes was installed, in the form of single electric wires ( $\varphi = 0.25$  mm). At an instant when they break (circuit break) as a result of cumulative jet operation, voltage drop in the subsequent measuring probes will act as a logical gate of start-stop type, or in other words the zero-one (0–1) type gate. The readings of individual probes breakage times allowed in addition to determine the velocity of the cumulative jet and to estimate its braking dynamics while passing through the subsequent elements of multi-layered target.

Key words: combined perforating and fracturing, detonative cumulation, linear charges.

### Przegląd literatury w zakresie konstrukcji ładunków kumulacyjnych

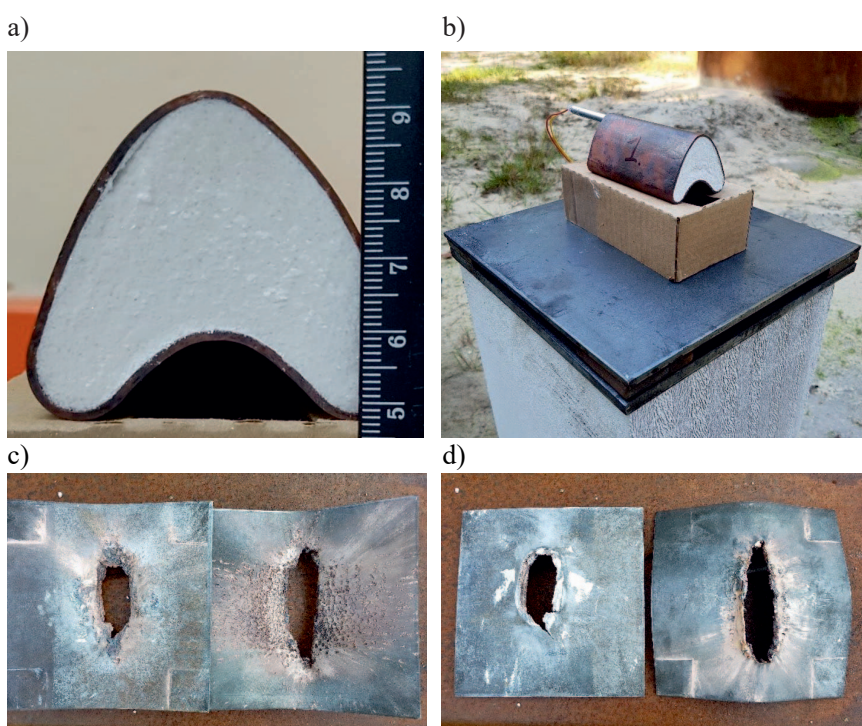
W ostatnich latach wiele zespołów naukowych badało wkładki kumulacyjne celem zwiększenia ich właściwości penetracji przeszkód. W artykule Sarana et al. (2013) autorzy przedstawili możliwość penetracji stalowego celu oraz bloku piaskowca przez ładunki kumulacyjne wykonane z aluminium. Badacze zestawili ze sobą wkładki stożkowe o rozwarciu  $100^\circ$  o stałej i zmiennej grubości oraz wkładki trąbkowe – również o stałej i zmiennej grubości; wkładki były wykonane z aluminium serii 5000, 6000 i 7000. W badaniach scharakteryzowano strumień kumulacyjny, używając techniki radiografii rentgenowskiej. Wyniki pokazały, że wkładki aluminium serii 5000, 6000 i 7000 mają podobne właściwości penetracji w odległości 3 kalibrów od stalowego celu. W artykule autorstwa Bai et al. (2012) opisane zostały doświadczenia związane ze zdolnością przebijania stalowych celów przez ładunki kumulacyjne z wkładkami wykonanymi z czystego wolframu, stopu wolframu–niklu–żelaza oraz stopu wolframu i miedzi. Badania wykazały, że wszystkie ładunki kumulacyjne tworzą ciągłe strumienie kumulacyjne z podobnymi prędkościami wierzchołków. Najlepsze parametry perforacyjne stalowego celu posiada wkładka kumulacyjna wykonana ze stopu wolframu i miedzi, ze względu na najniższą gęstość. Podobne badania przeprowadzili badacze z Pekinu (Zhao et al., 2016). Naukowcy badali możliwość przebijania stalowych celów przez ładunki kumulacyjne z wkładkami ze stopów wolframu–miedzi–cynku, wolframu–miedzi–niklu oraz wolframu i miedzi. Wyniki badań pokazały, że dodatki cynku i niklu do stopu wolframu i miedzi wyraźnie zmniejszają penetrację celu. Polski zespół opisuje badania strumieni kumulacyjnych powstających z metalicznych wkładek proszkowych, które w porównaniu do strumieni kumulacyjnych z wkładkami z litego metalu charakteryzują się wyższą zdolnością przebijania celu z jednoczesnym zachowaniem ciągłości strumienia w trakcie jego formowania się (Zygmunt et al., 2014). Autorzy artykułu przedstawiają proszkowe wkładki formowane wybuchowo (EFP – ang. *explosively formed penetrator*), w których wkładka kumulacyjna ma kształt wycinka powierzchni kuli (sfery) lub stożka o kącie

wierzchołkowym powyżej  $120^\circ$ . Borkowski et al. (2018) opisują eksperymentalne badania na temat wytwarzania oraz zdolności do przebijania celu przez zastosowanie pocisków formowanych wybuchowo z wkładkami wykonanymi metodą metalurgii proszków. Badania pokazały, że ładunki wykonane z wykorzystaniem metalurgii proszków mogą być w pełni funkcjonalnym substytutem konwencjonalnych wkładek z litego metalu, wytwarzanych jednak w bardziej skomplikowanym procesie technologicznym. Shuai et al. (2017) opisują w swoim artykule badania na ładunku kumulacyjnym, który posiada dwie wkładki kumulacyjne (stożkową oraz EFP) po dwóch przeciwnych stronach. Zamodelowali oni w programie LS Dyna cztery typy ładunku kumulacyjnego składającego się z dwóch różnych wkładek. Następnie wykonali badania poligonowe, w których wkładka EFP penetrowała pancierz, a wkładka stożkowa penetrowała betonowy cel. Badacze skupiali się na osiągnięciu największych prędkości strumienia kumulacyjnego w celu uzyskania optymalnych parametrów perforacji. Ho et al. (2018) przedstawiają w swoim artykule wkładkę kumulacyjną o wewnętrznej strukturze plastra miodu wykonaną za pomocą selektywnego topienia laserowego (STL). Materiałem, z którego wytworzono wkładkę, była stal nierdzewna wysokiej jakości SS 304L. Materiałem wybuchowym był C-4. Badania pokazały, że wkładka o przekroju plastra miodu uzyskała prędkość strumienia na poziomie 4200 m/s, a zdolność penetracji stalowych płyt była na poziomie 6,35 mm. Koślik et al. (2014) opisali konstrukcję nowego urządzenia do usuwania stanów awaryjnych związanych z utratą cyrkulacji w otworze. Nacinacz składa się z pojedynczego liniowego ładunku kumulacyjnego zamkniętego w hermetycznej obudowie wraz z zespołem zapalającym. Z kolei w artykule Chenga et al. (2018) opisano projekt nowatorskiego liniowego ładunku kumulacyjnego, który składa się z wkładki o podwójnym kącie rozwarcia (małym ( $40^\circ$ ) przy wierzchołku oraz dużym w dalszej części ( $60^\circ$ )). Zdolność do penetracji ładunku porównano z tradycyjnym ładunkiem liniowym (wkładka o rozwarciu  $60^\circ$ ). Testy pokazały, że zaprojektowany ładunek z wkładką miedzianą o grubości 1 mm przy zastosowaniu ładunku wybuchowego 8701 (95% RDX i 5% TNT) oraz z dystansem 10 mm ma o 29,72% lepszą zdolność do penetracji niż tradycyjny ładunek kumulacyjny. Artykuł

autorstwa Guo et al. (2019) opisuje zdolność ładunku kumulacyjnego z reaktywną wkładką do penetracji stalowej płyty. Reaktywna wkładka została wykonana z proszków aluminium (Al) oraz teflonu (PTFE) prasowanych na zimno o gęstości  $2,3 \text{ g/cm}^3$ . Do przeprowadzenia eksperymentów wybrano cztery dystanse – 0,5 kalibru, 1 kaliber, 1,5 kalibru oraz 2 kalibry. Badania pokazały, że ładunku kumulacyjne z wkładką reaktywną w porównaniu do tradycyjnych wkładek wytwarzają większą średnicę otworu, ale mniejszą długość kanału perforacyjnego ze względu na fragmentaryzację płyt stalowych. Głębokość penetracji okazała się silnie zależna od czasu opóźnienia inicjacji strumienia reaktywnego. Guo et al. (2016) zbadali interakcję pomiędzy strumieniem kumulacyjnym w ładunku kumulacyjnym z wkładką wykonaną ze stopu wolframu i miedzi a różnymi celami: celem wykonanym z czystej miedzi, celem wykonanym ze stali węglowej oraz celem ze stopu Ti-6Al-4V. Naukowcy ustalili, że interakcja pomiędzy strumieniem a celem ma znaczący wpływ na głębokość penetracji. Badania wykazały również, że interakcja pomiędzy ładunkiem i celem ze stopu Ti-6Al-4V jest najsilniejsza, co powoduje zwiększone rozproszenie energii strumienia kumulacyjnego oraz zmniejszoną głębokość penetracji celu. Artykuł Wanga et al. (2018) przedstawia wyniki badań na temat wpływu kąta rozwarcia wkładki kumulacyjnej oraz materiału wykonania wkładki na penetracje ułożonych warstwami oraz oddalonych od siebie betonowych celów. Wyniki badań pokazały, że ładunek kumulacyjny z wkładką z aluminium tworzy największy krater w betonowych celach. Ładunek kumulacyjny z obudową wykonaną z miedzi powoduje najgłębszą penetrację. Badania wskazały również, że w przypadku, gdy kąt rozwarcia stożka jest mniejszy niż  $120^\circ$ , to oddalone od siebie betonowe cele powodują zmniejszenie penetracji przez ładunki kumulacyjne z wkładkami stalowymi oraz miedzianymi. Zuklic et al. (2016) opisali w swoim artykule zastosowanie ładunków kumulacyjnych z obudową cynkową jako ładunków, których detonacja powoduje mniej pozostałości zatykających tunel perforacyjny w porównaniu do tradycyjnych ładunków stalowych. Badania pokazały, że drobny charakter odpadów powstałych poprzez zastosowanie ładunków cynkowych sprawia, że są one znacznie lepsze od ładunków stalowych, jeśli chodzi o możliwość usunięcia pozostałości ładunków z otworu wiertniczego. Badania z wykorzystaniem cynkowej obudowy ładunku kumulacyjnego

przedstawili również Satti et al. (2016), opisując przeprowadzone przez siebie badania porównawcze w laboratorium przepływów pomiędzy ładunkami kumulacyjnymi z obudowami cynkowymi oraz stalowymi. Wyniki eksperymentów pokazały, że średnia głębokość penetracji przy zastosowaniu ładunków z obudową stalową była nieco wyższa niż przy zastosowaniu ładunków z obudową cynkową. Badania wykonane na dwóch otworach wiertniczych dowiodły, że podciśnienie było w stanie je oczyścić i tym samym zwiększyć ich produktywność dzięki zastosowaniu ładunków z cynkiem. Han et al. (2010) opisali oddziaływanie ładunków kumulacyjnych z obudową stalową oraz cynkową pod względem utworzonego ciśnienia oraz temperatury w obudowie perforatora. Ładunki cynkowe wytwarzają wyższy impuls ciśnienia oraz generują większą temperaturę po detonacji. Detonacja ładunków kumulacyjnych z obudową cynkową wytworzyła dużo więcej ciepła w porównaniu do ładunków stalowych. Znaczne ilości ciepła powstałe w wyniku reakcji egzotermicznej ładunków z obudową cynkową przyczyniły się do spowodowania większych uszkodzeń na korpusie perforatora.

Również zespół badawczy INiG – PIB w Krakowie (Habera i Hebda, 2020) podjął próby opracowania konstrukcji ładunku kumulacyjnego liniowego z myślą o jego zastosowaniu w zabiegach perforacji i perfoszczelinowania odwiertów



**Rys. 1.** a) Ładunek kumulacyjny liniowy uformowany z rury miedzianej  $\varphi = 50 \text{ mm}/d = 1 \text{ mm}$ ; b) widok stanowiska strzałowego – płyta stalowa górna  $d = 5 \text{ mm}$ , płyta stalowa dolna  $d = 10 \text{ mm}$ ; c) efekt perforacji płyt – widok wlotu strumienia kumulacyjnego; d) efekt perforacji – widok otworów wylotowych

**Fig. 1.** a) The linear shaped charge formed from  $\varphi = 50 \text{ mm}/d = 1 \text{ mm}$  copper tube; b) view of shooting stand – upper steel plate  $d = 5 \text{ mm}$ , lower steel plate  $d = 10 \text{ mm}$ ; c) effect of perforation job on steel plates – view of cumulative jet inlet hole; d) effect of perforation job – view of outlet holes

ropnych i gazowych. W 2020 roku przeprowadzono serię badań strzałowych ładunku powstałego w wyniku matrycowego uformowania heksogenu flegmatyzowanego (RDX) w cienkościenniej ( $d = 1$  mm) rurce miedzianej (Cu) o średnicy zewnętrznej  $\varphi = 50$  mm. Badania wstępne zaproponowanej konstrukcji polegały na próbie perforacji płyt stalowych posadowionych na bloku betonowym. Etap przygotowań i rezultaty testu strzałowego przedstawiono na rysunku 1.

Wynikiem tych prac była obserwacja zdolności przebicia przegrody dwuwarstwowej (płyty stalowe 1 i 2) jednak bez możliwości określenia głębokości szczeliny perforacyjnej z powodu skruszenia i całkowitej fragmentacji części betonowej. Z uwagi na znaczne gabaryty ładunku liniowego i obłożenie materiałem wybuchowym zdecydowano się podjąć prace optymalizacyjne ładunku kumulacyjnego liniowego, czego efektem było opracowanie nowego ładunku w obudowie miedzianej o grubości 3 mm. Wykonano serię prototypową ładunków kumulacyjnych o długości  $L = 250$  mm i naważce materiału wybuchowego (heksoflenu) w zakresie od  $m = 355$  g do  $m = 401$  g. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy ładunek kumulacyjny, przygotowanie do testu strzałowego, oraz rezultat jego działania na poligonie doświadczalnym.

Zwiększenie grubości ścianki ładunku z 1 mm do 3 mm oraz wysmuklenie kształtu wgłębienia kumulacyjnego skutkowało zaobserwowaniem nie gorszych parametrów przebicia przegrody dwupłytywowej względem ładunku liniowego o mniejszej naważce materiału wybuchowego. Pozytywne wyniki testów strzałowych zachęciły autorów do dalszych badań, czego efektem jest niniejsza publikacja.

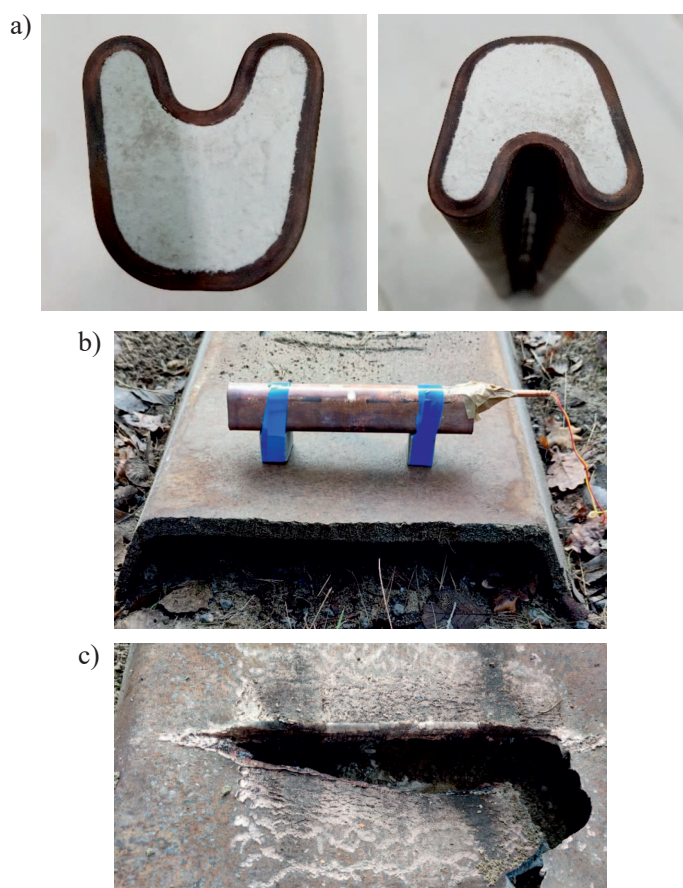
### Cel badań

Prezentowany materiał przedstawia nowe spojrzenie na sposób perforacji odwiertów i być może przyczyni się do dalszej dyskusji nad zasadnością i korzyściami potencjalnego wprowadzenia liniowych ładunków kumulacyjnych do praktyki przemysłowej. W omawianym przypadku celem badań poligonowych była fizyczna weryfikacja zdolności liniowego ładunku kumulacyjnego (LŁK) do perforowania celu wielowarstwowego.

### Zakres badań

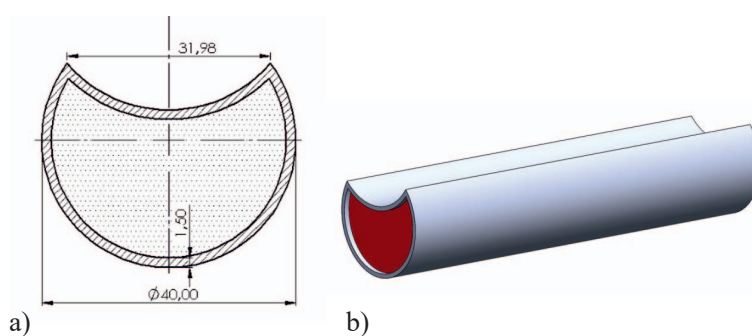
Seria badań strzałowych obejmuje testy trzech rodzajów ładunków liniowych wytypowanych do stosowania w urządzeniu perforująco-szczelinującym. Testom poddano ładunek:

- LŁK w obudowie ołowiowej o przekroju kołowym  $\varphi = 40$  mm z wgłębieniem kumulacyjnym (rys. 3);



**Rys. 2.** a) Widok przekrojowy nowego ładunku kumulacyjnego liniowego o grubości ścianki  $d = 3$  mm; b) widok układu strzałowego – przykładowy test przebicia jednowarstwowej przegrody stalowej o grubości 20 mm; c) efekt działania testowanego ładunku liniowego

**Fig. 2.** a) Cross-sectional view of the new, linear shaped charge, featuring wall thickness  $d = 3$  mm; b) view of shooting arrangement – exemplary test of 20 mm thick single-layer steel barrier; c) effect of tested linear shaped charge action

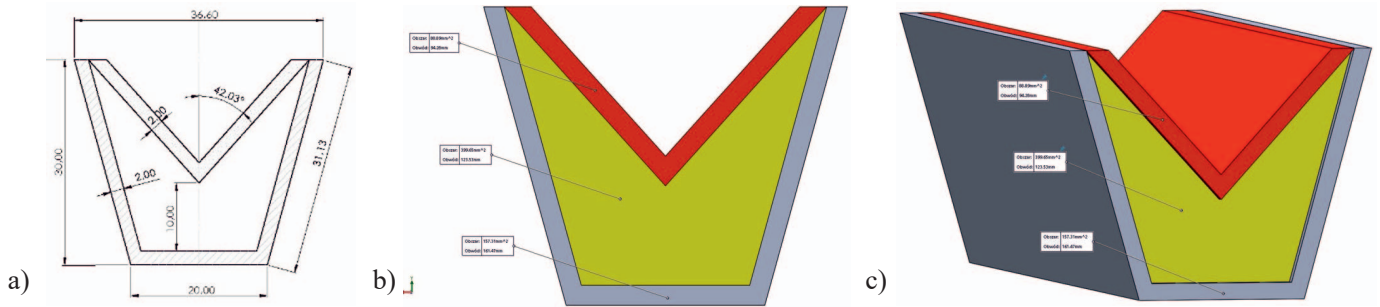


**Rys. 3.** a) Przekrój poprzeczny LŁK  $\varphi = 40$  mm; b) widok ładunku kumulacyjnego liniowego LŁK  $\varphi = 40$  mm

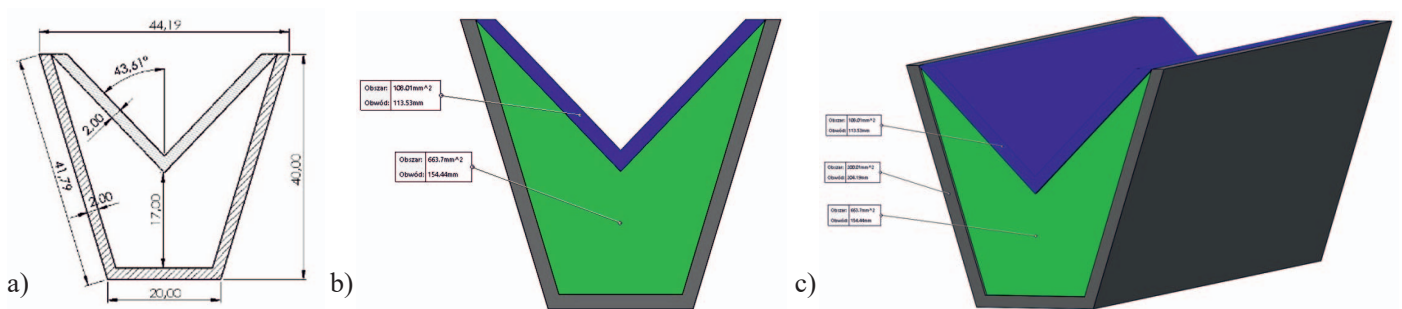
**Fig. 3.** a) Cross-section of  $\varphi = 40$  mm LSC; (b) view of the  $\varphi = 40$  mm linear shaped charge

- LŁK z miedzianą wkładką kumulacyjną w obudowie stalowej w kształcie trapezu 20/30 mm (rys. 4);
- LŁK z wkładką kumulacyjną z litej miedzi w obudowie stalowej w kształcie trapezu 20/40 mm (rys. 5).

Na rysunku 6 przedstawiono reprezentację wyrobów gotowych przygotowanych do testów poligonowych. Są to od



Rys. 4. a) Rysunek wymiarowy ŁŁK TR-20/30 mm; b) przekrój poprzeczny ŁŁK TR-20/30 mm; c) widok izometryczny ŁŁK TR-20/30 mm  
 Fig. 4. (a) Dimensional drawing of TR-20/30 mm LSC; (b) cross-sectional view of the TR-20/30 mm LSC; (c) isometric view of the TR-20/30 mm LSC



Rys. 5. a) Rysunek wymiarowy ŁŁK TR-20/40 mm; b) przekrój poprzeczny ŁŁK TR-20/40 mm; c) widok izometryczny ŁŁK TR-20/40 mm  
 Fig. 5. (a) Dimensional drawing of TR-20/40 mm LSC; (b) cross-sectional view of the TR-20/40 mm LSC; (c) isometric view of the TR-20/40 mm LSC



Rys. 6. Widok ładunków kumulacyjnych liniowych przygotowanych do badań sprawnościowych w warunkach poligonu doświadczalnego

Fig. 6. View of linear shaped charges, prepared for performance testing in conditions of experimental fireground

lewej: ładunki kumulacyjne w osłonie ołowiowej o przekroju kołowym  $\varphi = 40$  mm, ładunki kumulacyjne trapezowe większe TR 20/40 mm oraz ŁŁK trapezowe mniejsze TR 20/30 mm.

Podstawowe dane przygotowanych ładunków zawarto w tabeli 1 – obejmują one, oprócz numeru testu i nazwy ładunku, wagę ładunku ŁŁK ogółem, wagę materiału wybuchowego w ładunku, gęstość zaprasowania materiału wybuchowego oraz wymiar przekroju poprzecznego płyt stalowych, do których były realizowane strzały.

Tabela 1. Zestawienie ŁŁK przeznaczonych do badań strzałowych oraz parametry celu (płyty 1 i 2)  
 Table 1. The list of LSCs intended for shooting tests and parameters of target (plate 1 and 2)

Test	Ładunek	Waga ładunku	Gramatura materiału wybuchowego	Gęstość	Płyta 1	Płyta 2
		[g]	[g]			
1	TR-20/40	333	74,3	1,06	5 mm (frez)	10 mm
2	TR-20/30	288,9	56,4	1,18	5 mm	5 mm
3	O/ $\varphi = 40$	*	90,0	1,30	5 mm (frez)	10 mm
4	TR-20/40	331,1	78,1	1,10	5 mm	5 mm
5	O/ $\varphi = 40$	*	90,0	1,30	10 mm	10 mm
6	TR-20/30	286,9	55,3	1,15	10 mm	10 mm

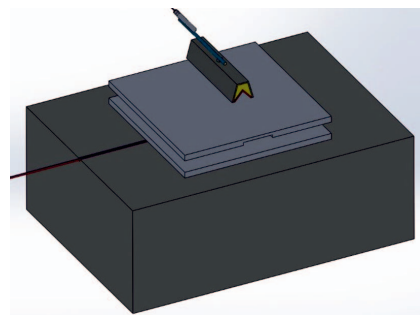
## Metoda badawcza i przebieg badań

Metoda badawcza dostosowana do charakteru prac strzałowych miała na celu zweryfikowanie tezy, czy zaproponowane ładunki kumulacyjne spełniają warunki techniczne i sprawnościowe do efektywnego zastosowania ich w przemyśle naftowym. Przyjętym kryterium była zdolność lub jej brak do perforowania celu wielowarstwowego w postaci dwóch płyt stalowych i odlewu betonowego. Widok stanowiska strzałowego zastosowanego w badaniach przedstawiono na rysunku 7.

Stanowisko badawcze, z natury rzeczy jednorazowego użycia, każdorazowo składało się z bloczka betonowego o wymiarach 400 mm × 250 mm × 150 mm i wytrzymałości statycznej na ścis-

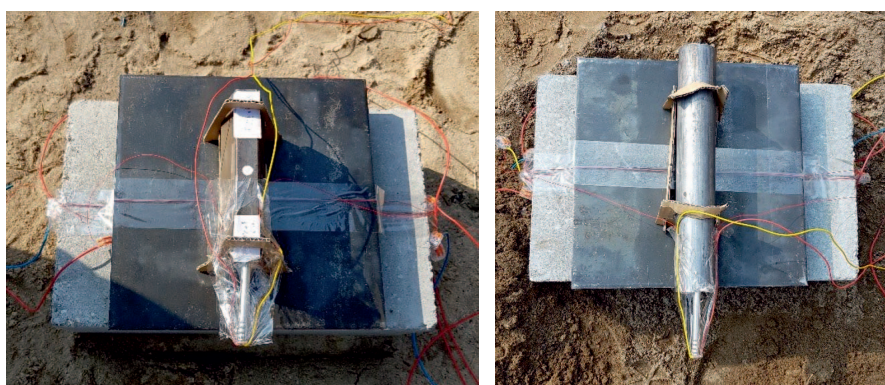
knięcie 20 MPa, na którym położone zostały równoległe dwie płyty stalowe z zachowaniem odstępu równego 20 mm. Grubość płyt to 5 mm i 10 mm. Na wierzchniej płycie stalowej pozycjonowano badany ładunek kumulacyjny w odległości jednego kalibru, czyli dystansu równego rozwarości ładunku trapezowego oraz pełnej średnicy ładunku o przekroju kołowym. Ponadto w płaszczyznach zmiany ośrodka (stal–powietrze; powietrze–stal; stal–beton) zamontowano zestaw napięciowych sond pomiarowych w postaci cienkich pojedynczych przewodów elektrycznych ( $\varphi = 0,25$  mm). W chwili ich zerwania (przerwania obwodu) w wyniku działania strumienia kumulacyjnego – spadek napięcia w kolejnych sondach pomiarowych zadziała na zasadzie bramki logicznej typu start–stop lub innymi słowy zero–jeden (0–1). Odczytanie czasów przerwń poszczególnych sond pozwoliło dodatkowo wyznaczyć prędkość strumienia kumulacyjnego i oszacować dynamikę jego wyhamowywania wraz z pokonywaniem kolejnych elementów celu wielowarstwowego.

Materiał i geometria układu strzałowego (rys. 8) mają na celu przybliżać warunki techniczne odwertu, tzn. układ płyt stalowych to reprezentacja rur okładzinowej i korpusowej urządzenia, zaś blok betonowy to odzwierciedlenie skały złożowej. Należy jednak pamiętać, że pełen obraz zachowania się ładunków kumulacyjnych można uzyskać dopiero w wyniku przeprowadzenia testów w warunkach operacyjnych (ciśnienia i temperatury). Zastosowana aparatura pomiarowa została przedstawiona na rysunku 9.



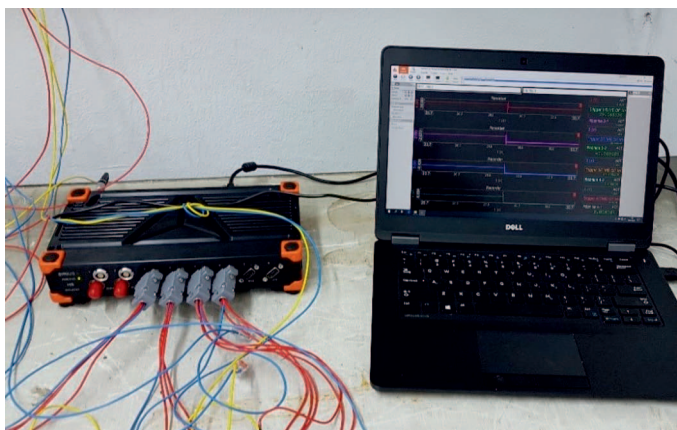
**Rys. 7.** Projekt stanowiska badawczego do oceny skuteczności przebijania celu wielowarstwowego przez liniowe ładunki kumulacyjne

**Fig. 7.** The design of testing stand for multi-layered target perforating ability of linear shaped charges



**Rys. 8.** Widok układu badawczego w trakcie przygotowań do testów strzałowych. Zestaw zawiera bloczek betonowy, układ dwóch płyt stalowych, ładunek kumulacyjny liniowy, zapalnik elektryczny bezzwłoczny

**Fig. 8.** View of experimental setup during preparation for shooting tests. The set includes concrete block, the assembly of steel plates, the linear shaped charge and immediate electrical igniter



**Rys. 9.** Widok sprzętu pomiarowego w pomieszczeniu technicznym na poligonie strzałowym – ultraszybki wielokanałowy rejestrator sygnałów cyfrowych i analogowych firmy Dewesoft®, działający z maksymalną częstotliwością 1 MHz, co umożliwia zapis przebiegu zdarzeń szybkozmiennych z dokładnością do 1 mikrosekundy

**Fig. 9.** View of testing equipment in technical room on the fire-ground – the ultra-fast, multi-channel recorder of digital signals, by Dewesoft®, operating at 1 MHz maximum frequency, which enables recording fast-variable events with 1 micro-second resolution




**Wyniki badań**

Rezultaty prób strzałowych przedstawiono:

- w formie tabelarycznej zawierającej informację o rodzaju testowanego ładunku i efektach przebijania celu wielowarstwowego (tab. 2);
- w postaci zbioru fotografii przedstawiających przestrzeleny płyty stalowych (rys. 10 i 11) oraz
- w formie wykresów przedstawiających prędkość strumienia kumulacyjnego zarejestrowaną poprzez układ sond napięciowych (rys. 12).

**Tabela 2.** Zestawienie wyników testów strzałowych (LŁK) liniowych ładunków kumulacyjnych realizowanych na celach wielowarstwowych

**Table 2.** Summary of linear shaped charges (LSCs) shooting tests results, performed on multi-layered targets

Ładunek		Przebite		
		plyta #1	plyta #2	beton
 TR-20/40	test nr 1	tak	nie	skruszenie
	test nr 4	tak	nie	skruszenie
 TR-20/30	test nr 2	nie	nie	skruszenie
	test nr 6	nie	nie	skruszenie
 O/φ = 40	test nr 3	tak	tak	perforacja
	test nr 5	tak	tak	perforacja

Testom strzałowym poddano sześć liniowych ładunków kumulacyjnych, jako reprezentację różnych typów rozwiązań zarówno konstrukcyjnych, jak i wielkości obciążenia wagowego materiałem wybuchowym. Przebadano pod względem zdolności przebijania celu wielowarstwowego ładunki typu trapezowego TR-20/30 i TR-20/40 oraz ładunek o przekroju kołowym  $O/\varphi = 40$ , dla których otrzymano najlepsze wyniki penetracji i głębienia celu. W przypadku ładunków trapezowych oznaczonych TR-20/30 założone warunki przebicia celu wielowarstwowego okazały się nie do spełnienia. W serii testów nie uzyskano przebicia żadnej z przegród stalowych, a cel betonowy został jedynie skruszony od dynamicznego nacisku płyt stalowych. Połowiczny sukces wykazały efekty cięcia ładunkiem TR-20/40, w przypadku którego zaobserwowano przecięcie tylko pierwszej płyty stalowej.

Zdecydowanie najlepsze rezultaty perforacji (test nr 3 i 5) osiągnięto dla ładunków  $O/\varphi = 40$ , które perforowały obie płyty stalowe, oraz głębiąc szczelinę perforacyjną, przecinały całkowicie blok betonowy znajdujący się na spodzie modelu strzałowego.

Pomiar i analizę prędkości strugi kumulacyjnej prowadzono za pomocą analizatora Sirius (rys. 9). Rejestracja wyników odbywała się z rozdzielczością 1 MHz. Poszczególne sondy były umieszczane odpowiednio:

- przy zapalniku elektrycznym w miejscu inicjowania detonacji;
- na pierwszej płycie stalowej o grubości 10 mm z podtoczeniem na 5 mm – w odległości 5,7 cm od zapalnika;
- na drugiej płycie stalowej o grubości 10 mm – w odległości 8,7 cm od zapalnika;
- na betonowym bloczku w odległości 9,8 cm od zapalnika.

Test nr 1

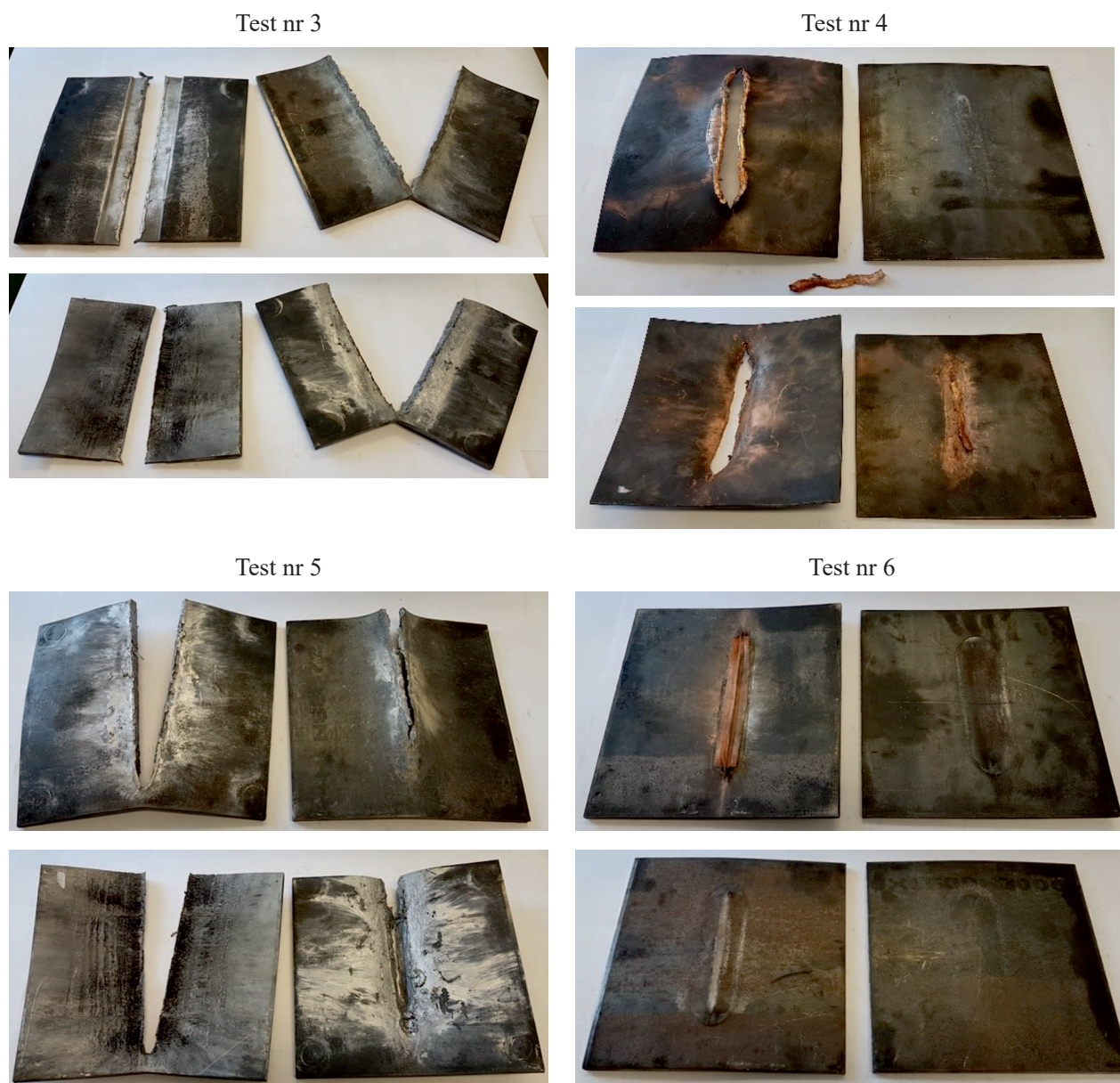


Test nr 2



**Rys. 10.** Wyniki badań poligonowych dla testów nr 1 i 2 – obrazy przestrzelonych płyt stalowych

**Fig. 10.** The results of fireground tests for tests No. 1 and No. 2 – the images of penetrated steel plates



**Rys. 11.** Wyniki badań poligonowych dla testów nr 3–6 – obrazy przestrzelonych płyt stalowych  
**Fig. 11.** The results of fireground tests for tests No. 3–6– the images of penetrated steel plates

Na rysunku 12 przedstawione jest zestawienie wykresów z analizatora z poszczególnymi spadkami napięć podczas penetracji przez strumień kumulacyjny kolejnych celów.

### Podsumowanie i wnioski

W toku pracy wytworzono fizyczne modele opracowanych ładunków oraz poddano je testom sprawnościowym na poligonie doświadczalnym. Seria badań strzałowych objęła testy trzech rodzajów ładunków liniowych wytypowanych do stosowania we wgłębnych urządzeniach perforująco-szczelinujących. Testem poddano ładunek:

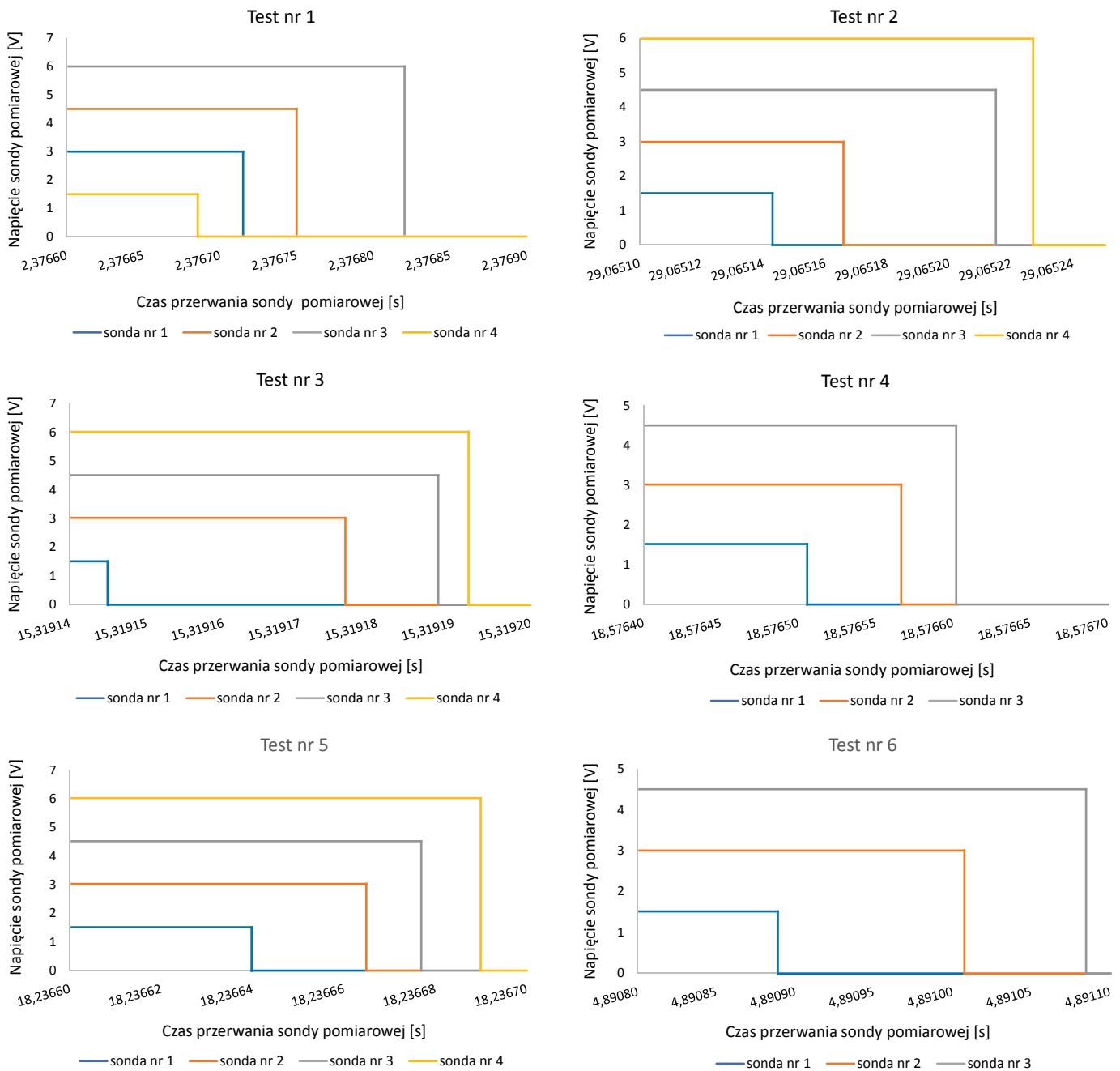
- LŁK w obudowie ołowiowej o przekroju kołowym  $\varphi = 40$  mm z wgłębieniem kumulacyjnym;

- LŁK z miedzianą wkładką kumulacyjną w obudowie stalowej w kształcie trapezu 20/30 mm;
- LŁK z wkładką kumulacyjną z litej miedzi w obudowie stalowej w kształcie trapezu 20/40 mm.

W świetle uzyskanych wyników należy stwierdzić, że:

1. Ładunki kumulacyjne liniowe o kształcie trapezowym oznaczone TR-20/30 nie spełniły narzuconych wymogów testowych, czyli warunku przebicia celu wielowarstwowego. W serii testów nie uzyskano przebicia żadnej z przegród stalowych, a cel betonowy został jedynie skruszony od dynamicznego nacisku płyt stalowych.
2. Ładunek o przekroju kołowym, nazwanym roboczo LŁK  $O/\varphi = 40$ , wykazuje uniwersalne cechy użytkowe i może być stosowany w urządzeniach wyposażonych w korpus stalowy, jak np. perforator PRS – 114 mm. Ładunek ten





**Rys. 12.** Czas przebicia poszczególnych sond pomiarowych przez strumień kumulacyjny pokonujący kolejne warstwy przeszkody  
**Fig. 12.** Penetration time of subsequent measuring probes by cumulative jet, passing subsequent layers of target

cechuje się najwyższą nawązką materiału wybuchowego (90 g) w porównaniu do pozostałych testowanych ładunków (~55 g i ~74 g).

- Ładunek typu trapezowego z wkładką kumulacyjną z litej miedzi w obudowie stalowej, który oznaczono symbolem LŁK TR-20/40, z uwagi na mniejsze zdolności przebicia może znaleźć zastosowanie w urządzeniu perforująco-szczelinującym typu bezkorpusowego.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Liniowy ładunek kumulacyjny do perfoszczelinowania odwiertów* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0019/ST/2020, nr archiwalny: DK-4100-0007/2020.

**Literatura**

Bai X., Liu J., Li S., Lv C., Guo W., Wu T., 2012. Effect of interaction mechanism between jet and target on penetration performance of shaped charge liner. *Materials Science and Engineering A*, 553: 142–148. DOI: 10.1016/j.msea.2012.06.003.

Borkowski J., Wilk Z., Koślik P., Szymańczyk L., Zygmunt B., 2018. Application of sintered liners for explosively formed projectile charges. *International Journal of Impact Engineering*, 118: 91–97. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.04.009.

Cheng X., Huang G., Liu C., Feng S., 2018. Design of a Novel Linear Shaped Charge and Factors Influencing its Perforation Performance. *Applied Sciences*, 8(10): 1863. DOI: 10.3390/app8101863.

Guo H., Zheng Y., Yu Q., Ge Ch., Wang H., 2019. Penetration behaviour of reactive liner shaped charge jet impacting thick steel

- plates. *International Journal of Impact Engineering*, 126: 76–84. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.005.
- Guo W., Liu J., Xiao Y., Li S., Zhao Z., Cao J., 2016. Comparison of penetration performance and penetration mechanism of w-cu shaped charge liner against three kinds of target: Pure copper, carbon steel and Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 60: 147–153. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2016.07.015.
- Habera Ł., Hebda K., 2020. Testing the effectiveness of multi-layer target penetration by linear shaped charges. *Nafta-Gaz*, 12: 919–928. DOI: 10.18668/NG.2020.12.05.
- Han Ch., Du M.H., Ference B., 2010. Effect of Shaped Charge Case Materials on Perforating Guns. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China*. DOI: 10.2118/130477-MS.
- Ho J., Lough C.S., Mulligan P., Kinzel E.C., Johnson C.E., 2018. Additive Manufacturing of Liners for Shaped Charges. Solid Freeform Fabrication 2018. *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*.
- Koślik P., Wilk Z., Frodyma A., Habera Ł., 2014. The split shot – Simulation study and testing effectiveness of the new tool for regaining circulation in borehole. *Nafta-Gaz*, 12: 891–898.
- Saran S., Ayisit O., Yavus M.S., 2013. Experimental Investigations on Aluminum Shaped Charge Liners. *Procedia Engineering*, 58: 479–486. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.055.
- Satti R.P., White R., Ochsner D., Osarumwense O., Zuklic S.N., Sampson T., 2016. New Insights into Optimizing Perforation Clean Up and Enhancing Productivity with Zinc-Case Shaped Charges. *SPE International Conference & Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/178935-MS.
- Shuai C., Wei-bing L., Xiao-ming W., Wen-jin Y., 2017. Penetration research of dual mode penetrator formed by shaped charge with wave sharper. *Procedia Engineering*, 173: 57–64. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.022.
- Wang Ch., Xu W.L., Yuen Ch. K., 2018. Penetration of shaped charge into layered and spaced-apart concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 112: 193–206. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.013.
- Zhao Z., Liu J., Guo W., Li S., Wang G., 2016. Effect of Zn and Ni added in W–Cu alloy on penetration performance and penetration mechanism of shaped charge liner. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54: 90–97. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.022.
- Zuklic S., Myers B., Satti R., 2016. Field Application Study of Zinc Based, Low Debris Perforating Charges. *SPE International Conference & Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/178934-MS.
- Zygmunt B., Wilk Z., Koślik P., 2014. On concept of sintered metallic liners for EFP charges. *Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, 5, 2(16): 63–76.



Dr inż. Łukasz HABERA  
Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Strzelniczej  
i Środowiskowej  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [lukasz.habera@inig.pl](mailto:lukasz.habera@inig.pl)



Mgr inż. Kamil Hebda  
Asystent w Zakładzie Zakład Inżynierii Strzelniczej  
i Środowiskowej  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [kamil.hebda@inig.pl](mailto:kamil.hebda@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU INŻYNIERII STRZELNICZEJ I ŚRODOWISKOWEJ

- konstruowanie urządzeń strzelniczych przeznaczonych do udostępniania poziomów ropo- i gazonośnych;
- opracowywanie technologii i metod prowadzenia prac strzałowych w odwiertach;
- projektowanie i realizacja zabiegów intensyfikacji przyprywy medium do odwiertu poprzez szczelino-  
wanie gazowe strefy przyotworowej złoża prochowymi generatorami ciśnienia lub intensywne udostępnianie perfogeneratorami;
- testowanie urządzeń strzałowych w warunkach otworopodobnych na poligonie doświadczalnym;
- projektowanie, modelowanie i testy sprawnościowe ładunków kumulacyjnych;
- opracowanie raportów o oddziaływaniu na środowisko a także prognoz dotyczących emisji i rozprze-  
strzenia się hałasu oraz zanieczyszczeń gazowych i pyłowych do powietrza z instalacji przemys-  
towych;
- pomiary emisji hałasu związanego z funkcjonowaniem instalacji przemysłowych;
- monitoring powietrza glebowego w rejonach instalacji przemysłowych oraz na terenach złóż węglowodorów;
- prognozowanie produktywności gazowej składowisk odpadów komunalnych i ich weryfikacja poprzez  
testy aktywnego odgazowania;
- opracowanie koncepcji technologicznych instalacji do odgazowania składowisk i utylizacji biogazu.



Kierownik: mgr inż. Antoni Frodyma Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
Telefon: 12 617 74 73 Faks: 12 653 16 65 E-mail: [antoni.frodyma@inig.pl](mailto:antoni.frodyma@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy