

Grzegorz **MOTRYCZ**  
Piotr **STRYJEK**  
Daniel **JASZCZ**

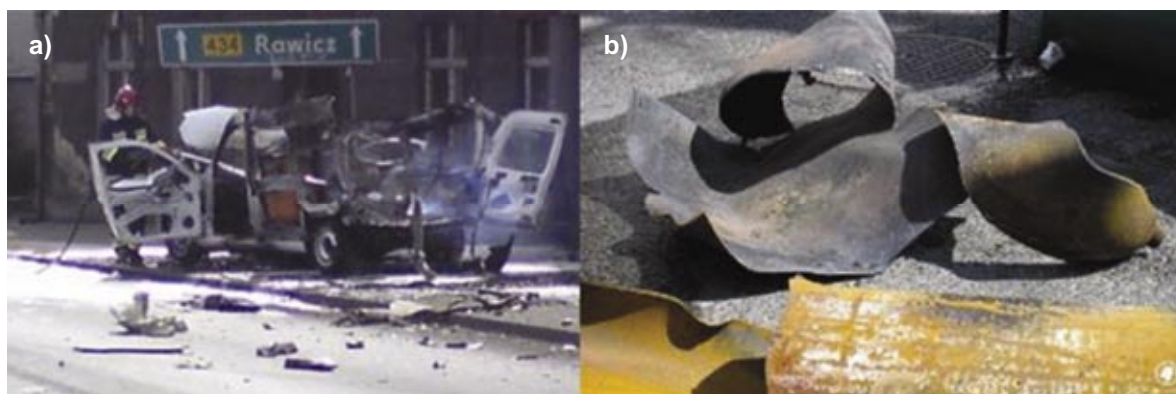
## BADANIA EKSPERYMENTALNE DEKOMPRESJI BUTLI Z ACETYLENEM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania szybkiej kamery pomiarowej w badaniach eksperymentalnych dekompresji butli z acetylenem w środowisku pożarowym. W badaniach wykorzystano optyczną technikę pomiarową. Jednym z głównych celów eksperymentu było obliczenie energii, jaką posiadają odłamki eksplodującej butli podczas pożaru doprowadzającego do eksplozji. Dodatkowo, za pomocą zaproponowanego rozwiązania starano się przedstawić zalety, jak i trudności wynikające z użycia sprzętu pomiarowego w planowanym eksperymencie. Na tej podstawie opracowano i zweryfikowano metodykę badawczą. Wyznaczono wartości strefy bezpieczeństwa dla zespołu badawczego, określono sposób i zasady odłamkowania tego typu butli stalowych.

**Słowa kluczowe:** gazy techniczne, acetylen, pożar, wybuch, odłamkowanie, szybka kamera, bezpieczeństwo pożarowe.

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z szeroko stosowanych gazów technicznych jest acetylen, przechowywany zazwyczaj w stalowej butli o specjalnej konstrukcji. Mieszanina acetyleny z tlenem i powietrzem jest najbardziej niebezpieczna pod względem wybuchowości w stosunku do wszystkich innych węglowodorów. Wzrost temperatury i ciśnienia jest istotnym czynnikiem procesu rozkładu acetyleny. Proces rozkładu zależy głównie od bilansu cieplnego – jeśli przyrost ciepła wewnątrz butli jest większy niż straty ciepła, wówczas zachodzi reakcja rozkładu. Proces rozkładu może również nastąpić wskutek wstrząsu. Podczas akcji ratowniczych należy zachować szczególną ostrożność i uwagę, szczególnie gdy butla została podgrzana do wysokiej temperatury. Eksplozja butli acetylenowej wiąże się również z promieniowaniem cieplnym (kulą ognia), wytworzeniem fali uderzeniowej oraz odrzutem butli. Szczególnie niebezpieczne są duże odłamki butli, które w momencie nadania im wysokiej prędkości przez siłę wynikającą z wybuchu, tworzą niebezpieczne elementy zdolne do niszczenia innych obiektów i będące bardzo dużym zagrożeniem dla osób postronnych.



**Rys. 1. Wybuch butli z acetylenem**

**a) widok zniszczonego pojazdu po wybuchu butli acetylenowej (fot. TVN24.pl)**

**b) elementy butli po wybuchu (fot. PSP Opole)**

## 2 METODYKA BADAŃ

### 2.1. Obiekt badań

Butla z acetylenem, która została wykorzystana do badań była butlą o konstrukcji stalowej bez szwu, wykonanej ze stali o średnicy zewnętrznej 0,229 m i długości 1,21 m, przy grubości płaszcza butli od 4 do 13 mm (w zależności od producenta) – rys. 2.

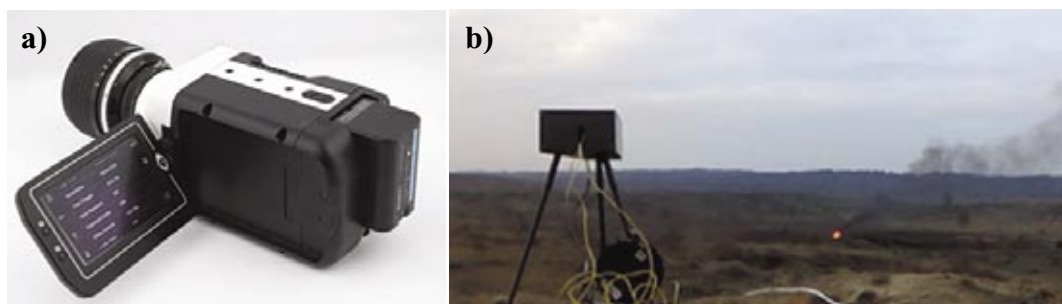


**Rys. 2. Butla z acetylenem użyta podczas badań**  
(fot. J. Ejsmont, A. Kołacki)

### 2.2. Stanowisko badawcze

Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone przez zespół Politechniki Gdańskiej na nieczynnym poligonie Marynarki Wojennej w Strzeczcu. W trakcie prób analizowano zachowanie się butli z  $C_2H_2$  poddanej działaniu wysokiej temperatury (symulacja pożaru), przedstawionej na rys. 2. Butla z  $C_2H_2$  została ustawiona w pozycji pionowej na stelażu przedstawionym na rys. 4. Ilość materiału palnego została tak dobrana, aby zapewnić dekompresyjne rozsadzenie butli.

Rejestrację parametrów fizycznych realizowano za pomocą ultraszybką kamerą optyczną Phantom Miro 310 przedstawionej na rys. 3. Kamera ta zapewniła rejestrację z pełną rozdzielczością obrazu 1280x800 monochromatycznego, do 3200 klatek na sekundę (fps). Rejestracja obrazu w mniejszej rozdzielczości skutkuje zwiększeniem liczby klatek do 650 000 (fps). Do analizy parametrów fizycznych odłamków wykorzystano oprogramowanie TEMA.



**Rys. 3. Kamera optyczna**

a) widok kamery

b) kamera w osłonie na stanowisku pomiarowym

(fot. EC Test Systems Sp. z o.o., Grzegorz Motrycz)

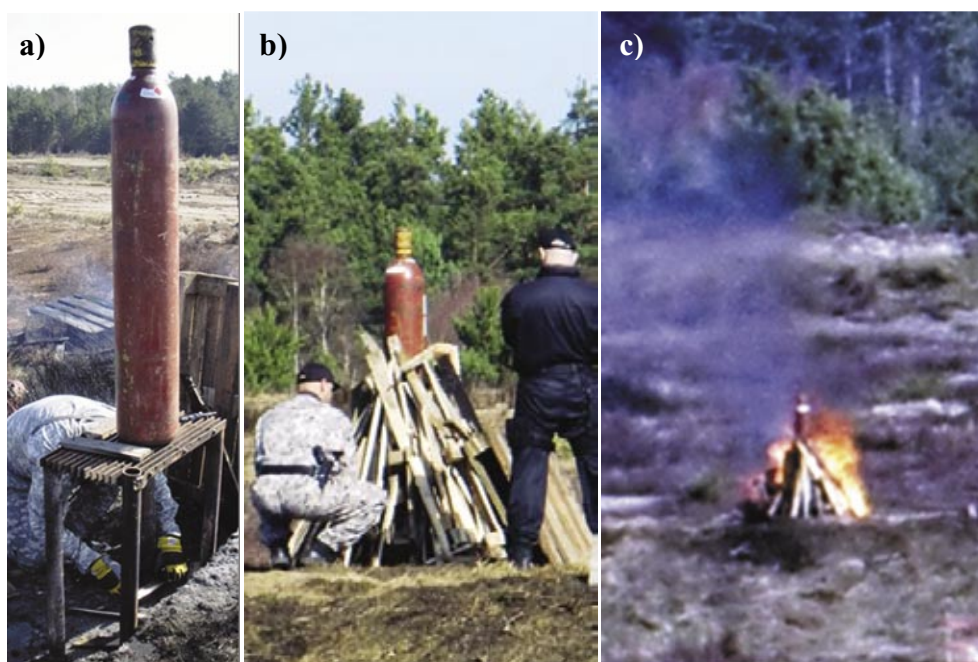
Ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa zespołowi badawczemu do wyznaczenia parametrów fizycznych dekompresyjnego wybuchu butli z gazem technicznym - zdecydowano się na wybór metody optycznej. Do głównych trudności przy tego typu pomiarach należy zaliczyć brak możliwości:

- przewidzenia kierunku odłamkowania butli;
- przewidzenia wielkości odłamków;
- użycia oczujnikowanego stanowiska pomiarowego bezpośrednio przy palącej się butli ze względu na ciśnienie rozchodzące się podczas wybuchu;
- użycia standardowych czujników ze względu na wysoką temperaturę w pobliżu pożaru.

W metodzie tej wykorzystano możliwość pomiaru przemieszczenia się odłamków butli oraz ich zmian kątowych. W celu ochrony przed uszkodzeniami spowodowanymi przez odłamki, kamerę Phantom Miro 310, umieszczono w specjalnie zaprojektowanej obudowie ochronnej przedstawionej na rys. 3b.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Badania poligonowe zostały przeprowadzone w następujących warunkach atmosferycznych: ciśnienie 1002 hPa, temperatura otoczenia 14°C, wilgotność 80%, prędkość wiatru około 0,5 m/s. Napełniona butla z acetylenem została ustawiona swobodnie w pozycji pionowej na przygotowanym metalowym stelażu – rys. 4a i obłożona materiałem palnym, nasączonym mieszaniną 50% oleju napędowego i benzyny – rys. 4b. Inicjacja pożaru została wykonana zdalnie za pomocą zapalnika elektrycznego – rys. 4c.

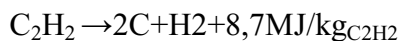


**Rys. 4. Stanowisko badawcze**  
a) mocowanie butli      b) przygotowanie paleniska,      c) inicjacja pożaru

(fot. J. Ejsmont, A. Kołacki)

Po inicjacji zapłonu, butla acetylenowa była cały czas objęta płomieniem (rys. 5a). Temperatura płomienia palącego się drewna oszacowana została na około 900 – 1000°C. Po upływie 495 sekund nastąpiła dekompresja butli, przedstawiona na rys. 5d.

Wiadomo, iż powyżej 400°C, dekompozycja acetylenu może zostać zapoczątkowana bez udziału inicjatora. W wyniku rozkładu etynu wydzielane jest ciepło, które powoduje, że reakcja staje się samonapędzająca, czemu towarzyszy gwałtowny wzrost ciśnienia, mogący doprowadzić do rozsadzenia butli. Dzieje się tak na skutek wysokiej reaktywności acetylenu, spowodowanej nietrwałością potrójnego wiązania pomiędzy atomami węgla. Reakcję zachodzącą podczas tego procesu przedstawiono poniżej.



W wyniku rozsadzenia butli na skutek obecności tlenu z powietrza, reakcja przechodzi w deflagracyjne lub detonacyjne spalanie wodoru oraz cząsteczek acetylenu, które nie uległy rozkładowi. Ciepło spalania wodoru mieści się w przedziale 120-142 MJ/kg i jest ponad dwukrotnie większe od ciepła spalania acetylenu [3]. Poniżej na rysunkach 5 a – f przedstawiono proces defragmentacji butli z acetylenem w środowisku pożarowym podczas prowadzonych badań eksperymentalnych.



Rys. 5a. 0 s - moment dekompresji

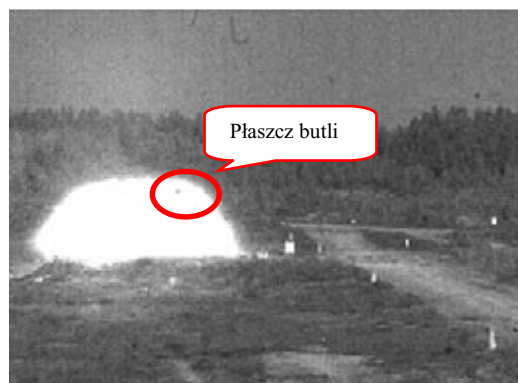


Rys. 5b. 0 - 0,014 s – ujście H<sub>2</sub> z butli

Po upływie 0,0195 s od momentu dekompresji nastąpił zapłon wydobywającego się H<sub>2</sub>.



Rys. 5c. 0 - 0,0195 s – czas zapłonu H<sub>2</sub>



Rys. 5d. 0,2695 s od dekompresji - zauważenie odłamka płaszcza butli

Po upływie 0,25 s od momentu zapłonu H<sub>2</sub> zaobserwowano falę termiczną – kulę ognia. Szerokość kuli ognia w maksymalnym rozmiarze oszacowano na około 13 m, natomiast wysokość kuli ognia na 4,7 m.



**Rys. 5e. 1,075 s od dekompresji –  
płaszcz butli osiągnął maksymalną  
wysokość**



**Rys. 5f. 2,686 s od dekompresji -  
miejsce upadku płaszcza butli**

Na rysunku 6b przedstawiono miejsce położenia płaszcza butli odrzuconego w wyniku wybuchu. Płaszcz butli w wyniku wybuchu został odrzucony na odległość około 138 m; następnie odbił się od powierzchni terenu i ruchem obrotowym przekoziółkował na odległość 145 metrów – rys. 6b.



**Rys. 6. Miejsce położenia płaszcza butli**  
a) miejsce uderzenia płaszcza butli  
acetylenowej w ziemię, b) pozycja butli po eksplozji  
(fot. G. Motrycz)

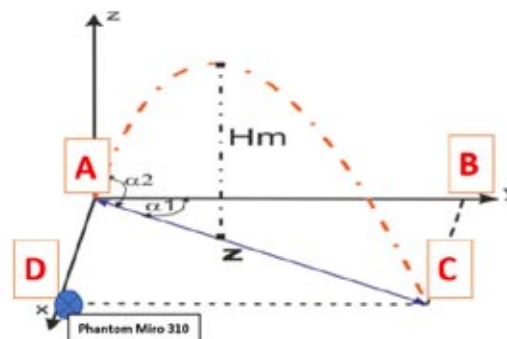
Na podstawie położenia fragmentów butli sporządzono szkic z miejsca przeprowadzenia eksperymentu. Z danych z analizy czasowej materiału filmowego zarejestrowanego kamerą Phantom Miro 310, odczytano parametry czasowe poszczególnych faz detonacji butli z acetylenem.

Przyjmując założenia upraszczające, w postaci pominięcia oporów powietrza, oraz założenia, że ruch odbywa się ze stałym przyspieszeniem grawitacyjnym  $g$   $[0, -g]$ , na podstawie zależności kinematycznych i trygonometrycznych wyznaczono wielkości fizyczne charakteryzujące przebieg eksperymentu. Na schemacie – rys. 8 przedstawiono parametr rzutu ukośnego, który odzwierciedla lot płaszcza butli podczas eksperymentu. Jak wiemy z literatury rzut ukośny możemy potraktować jako złożenie dwóch ruchów – jednostajnego w poziomie oraz jednostajnie opóźnionego w pionie.



**Rys. 7. Mapa terenu na którym przeprowadzono eksperyment**  
( Źródło Google Maps )

Z przeprowadzonej analizy materiału filmowego, oraz dokonanych pomiarów odległości położenia odłamków od miejsca eksplozji stwierdzono, iż czas od momentu dekompresji do upadku płaszcza butli na odległość 138 m wyniósł 2,686 s.



**Rys. 8. Rzut ukośny – schemat (opracowanie własne)**

**Opis:**  $x, y, z$  – współrzędne układu odniesienia,  $AC = Z$  – zasięg,  $H_m$  – maksymalna wysokość,  $AD$  – odległość kamery od umiejscowienia butli,  $AB$  - odległość stanowiska badawczego od drogi

Celem eksperymentu było wyznaczenie maksymalnej prędkości największego z odłamków butli, co pozwoliłoby na obliczenie jej energii kinetycznej. O ile pomiar prędkości np. pocisków wystrzeliwanych z karabinów jest stosunkowo prosty do zrealizowania przy użyciu specjalnych bramek/radarów pomiarowych, to w przypadku eksplozji butli eksperyment ma wiele zmiennych, które uniemożliwiają użycie tej metody, tzn. nie można przewidzieć, w którym kierunku, ani w pod jakim kątem nastąpi lot butli po eksplozji acetyleny. Dlatego konieczne jest użycie metody przedstawionej w artykule.



**Rys. 9. Schemat – upadku płaszcza butli**

Dla oszacowania prędkości butli zmierzono, na podstawie przyjętego układu współrzędnych, odległość (-ści) umiejscowienia stanowiska badawczego od drogi AB = 80 m. Odległość miejsca upadku płaszcza butli na drogę w stosunku do stanowiska badawczego AC = (z) wyniosła 138 m. Odległość umiejscowienia kamery Phantom Miro 310 od stanowiska badawczego (AD) wyniosła 270 m. Poza zasięgiem lotu ww. odłamka, na podstawie punktów charakterystycznych dla strzelnicy wojskowej, na której odbywały się próby, oszacowano maksymalną wysokość lotu na 13,1m.

Zasięg w rzucie ukośnym opisujemy poprzez równania:

$$z = \frac{V_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g} \quad (1)$$

Natomiast wysokość lotu oraz czas możemy zapisać jako:

$$Hm = v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha / 2 \cdot g \quad (2)$$

$$t = 2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha / g \quad (3)$$

Z równania 1-3, wyliczamy wartość prędkości:

$$V_0 = 68,9 \text{ m/s} = 248 \text{ km/h}$$

Masa największego odłamka butli wynosiła około 19,1 kg. Zakładając, że butla największe zniszczenia wywołuje na początku eksplozji (np. przebicie ściany magazynu gdzie jest składowana), energia kinetyczna płaszcza butli została oszacowana na 45,3 J. Mając na uwadze fakt, że odłamek butli charakteryzuje się dodatkowo nieregularnymi i zazwyczaj ostrymi krawędziami, a sam odłamek porusza się z prędkością około 248 km/h, wartość tej energii jest wystarczająca nie tylko do spowodowania bardzo dużych obrażeń ciała człowieka, ale nawet do poważnych uszkodzeń konstrukcji lżejszych budynków.

Należy pamiętać, że poza energią kinetyczną samego odłamka, na strukturę budynku dodatkowo będzie działać fala uderzeniowa pochodząca od ciśnienia wybuchu i temperatura związana z płomieniem pożaru.

#### 4. WNIOSKI

W trakcie badań eksperymentalnych potwierdzono możliwość wykorzystania ultra szybkiej kamery do analizy parametrów kinematycznych procesu wybuchu butli acetylenowych. Stwierdzono, iż przy takim typie eksperymentów, strefa bezpieczna dla zespołu badawczego powinna wynosi minimum 250-300 m.

Do obliczeń użyto szeregu uproszczeń, m.in. założenia, że nie występują opory powietrza podczas lotu odłamka. Jednak powiązanie obliczeń byłoby bardzo trudne ze względu na nieregularność odłamka i dodatkowo jego rotację podczas lotu. Ponadto przyjęto założenie, że butla dokonuje największych zniszczeń w pierwszej fazie wybuchu, gdzie opory powietrza na drodze pierwszych metrów można pominąć. Potwierdzono natomiast, że zagrożenie ze strony butli z acetylenem jest bardzo wysokie, a potencjalne szkody związane zarówno z dużą prędkością lotu odłamków, jak i energią kinetyczną związaną z ich dużą masą mogą być bardzo poważne nie tylko dla osób postronnych, ale także konstrukcji obiektów.

Pełny opis zjawisk zachodzących podczas dekompresji butli z acetylenem wymaga przeprowadzenia dalszych badań pozwalających określić i opisać między innymi rozkład ciśnienia wybuchu, charakter fali uderzeniowej i sposób jej rozprzestrzeniania oraz mapę odłamkowania.

## 5. LITERATURA

- [1] Blanchard R., Fletcher J., Hill D., Jagger S., Pitchard D., "Safety of acetylene containing cylinders during and after involvement in a fire", Communities and Local Government, 2007.
- [2] Mizutani T., Miyake A., Matusi H., Decomposing deflagration properties of acetylene under low temperatures, „Journal of Loss Prevention In the Process Industries”, s. 688 – 690, 2007.
- [3] Pólka M. „Niebezpieczeństwo pożarowo – wybuchowe związane z eksploatacją butli acetylenowych” 2013.
- [4] Ejsmont J., Kołacki A. „Neutralizacja butli z acetylenem z wykorzystaniem strzelców wyborowych. Poligon Marynarki Wojennej RP w Strzeczcu 02-03 kwietnia 2011” 2011.
- [5] Kołacki A., Ejsmont J., Motrycz G., Stryjek P. „Transport materiałów niebezpiecznych - butli acetylenowych a bezpieczeństwo innych użytkowników na drodze” materiały konferencyjne VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna „Problemy Bezpieczeństwa w Pojazdach Samochodowych” Kielce - Cezdyna, luty 2012 r.
- [6] Świczko-Żurek B., Ejsmont J., Ronowski G., „Noise related to gas bottles explosions”, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, T. 255, Vol. 7 pp. 591-597.
- [7] Ejsmont J., Świczko-Żurek B., Ronowski G., „Shooting Gas Cylinders to Prevent Their Explosion in Fire”, International Scholarly and Scientific Research Innvation, 2017, pp. 29-37.

## EXPERIMENTAL DECOMPRESSION TESTING OF AN ACETYLENE CONTAINING CYLINDER

**Abstract.** The paper presents the possibilities of using a high-speed measuring camera in experimental tests of decompression of acetylene cylinders in a fire environment. Optical measuring technique was used in the tests. One of the main goals of the experiment was to calculate the energy that the fragments of an exploding cylinder would have during a fire that led to the explosion. In addition, the proposed solution was used to present the advantages and difficulties resulting from the use of measuring equipment in the planned experiment. On this basis, the research methodology was developed and verified. The values of the safety zone for the research team were determined, the manner and the rules of fracturing of this type of steel cylinders were determined.

**Keywords:** industrial gases, acetylene, fire, explosion, fracturing, high-speed camera, fire safety.