

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2018), 27 (4), 516–523
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2018), 27 (4)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2018), 27 (4), 516–523
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2018), 27 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2018.27.4.48

Marzena PÓŁKA, Bożena KUKFISZ

Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej
w Warszawie
Faculty of Fire Safety Engineering, The Main School of Fire Service

Butle i wiązki acetylenowe w warunkach pożaru **Acetylene cylinders and bundles under fire conditions**

Słowa kluczowe: acetylen, zagrożenie środowiska pożarowego, wybuchy
Key words: acetylene, fire hazard, explosions

Wprowadzenie

Wiedza z zakresu bezpieczeństwa jest wiedzą interdyscyplinarną. Łączy ona w dużym zakresie nauki techniczne, związane ściśle w ramach inżynierii bezpieczeństwa pożarowego z inżynierią środowiska, w tym w szczególności z badaniem mechanizmów ekspansji zagrożeń pożarowych, wybuchowych, chemicznych itp. Zagrożenia związane z eksploatacją butli acetylenowych najczęściej są efektem zaniedbania zasad bezpieczeństwa przez pracowników i niedostosowania stanowisk pracy do określonych wymagań, ale także z niewiedzy. Dostyc często zdarza się, że ochrona przed zagrożeniami pożarowo-wybuchowymi nie jest wdrażana i realizowana konsekwentnie, czego na-

stępstwem są tragiczne skutki. Na szczęście zdarzenia nadzwyczajne z udziałem butli acetylenowych nie występują często. Analiza pożarów i wybuchów powstałych w przemyśle (Babrauskas, 2001; Price, 2006; Blanchard, Fletcher, Hill, Jagger i Pitchard, 2007) wykazuje, że zdarzenia nadzwyczajne z udziałem butli acetylenowych charakteryzują się dużą nieprzewidywalnością oraz niepowtarzalnością. Stąd też strażacy podczas wykonywania czynności ratowniczych muszą stosować szczególne środki ostrożności. Bardzo często zdarza się, że to właśnie ratownicy są ofiarami takich zdarzeń. Podczas eksploatacji butli z acetylenem, magazynowania czy wytwarzania acetyleny może dojść do powstania zdarzeń awaryjnych, pożarów lub wybuchów, które często niosą ze sobą tragiczne skutki w postaci ofiar śmiertelnych, utraty zdrowia przez ludzi oraz znacznych strat materialnych spowodowanych zniszczeniami. Z takimi sytuacjami można mieć do czynienia między

innymi w przemyśle produkcji tworzyw sztucznych, spawalniczym, chemicznym i analitycznym. Stąd też szczególnie istotne są profilaktyczne przedsięwzięcia inżynierskie dążące do zachowania środowiska przyrodniczego w stanie równowagi oraz zachowania jego możliwości do minimalizacji potencjalnych skutków zdarzeń niepożądanych w środowisku, w tym zdarzeń awaryjnych, w których występują butle z acetylenem.

Celem artykułu jest przedstawienie właściwości pożarowo-wybuchowych acetyleny, wymagań w zakresie magazynowania i transportowania tego gazu oraz ukazanie zestawienia wyników badań przeprowadzonych na poligonie z udziałem pojedynczych i wiązek butli z acetylenem.

Właściwości pożarowo-wybuchowe acetyleny

Budowa chemiczna acetyleny decyduje o jego niebezpiecznych właściwościach. Acetylen jest związkiem bardzo niestabilnym i reaktywnym. W warunkach normalnych acetylen (etylen) jest gazem bezbarwnym o słodkim smaku i nieprzyjemnym zapachu przypominającym czosnek, pochodzącym od zawartych w nim zanieczyszczeń. Etylen jest gazem lżejszym od powietrza, słabo rozpuszcza się w wodzie i innych rozpuszczalnikach o budowie polarnej. Acetylen jest gazem palnym, cechującym się bardzo dużą niestabilnością i reaktywnością w normalnych warunkach jego występowania. Wpływ na wybuchowość acetyleny oprócz budowy chemicznej mają przede wszystkim szerokie granice wybuchowości (od 2,4% obj. do 83% obj. H),

mała wartość minimalnej energii zapłonu (*MEZ*), w przypadku acetyleny *MEZ* wynosi 0,011 mJ i jest ponad 25 razy mniejsza od *MEZ* metanu wynoszącej 0,28 mJ czy też duża wartość ciepła spalania, w przypadku acetyleny ciepło spalania w tlenie wynosi ok. 50 MJ·kg⁻¹. Wartość ta zbliżona jest do wartości ciepła spalania gazu LPG (ok. 54 MJ·kg⁻¹) oraz gazu ziemnego (do ok. 51 MJ·kg⁻¹ w przypadku mieszanek wysokometanowych).

Acetylen charakteryzuje się stosunkowo niską jak na gaz palny temperaturą samozapłonu, a mianowicie 305°C. Dla porównania temperatura samozapłonu LPG sięga 287°C, a gazu ziemnego mieści się w przedziale 480–630°C. W przypadku zastosowania acetyleny w otoczeniu czystego tlenu temperatura płomienia wzrasta nawet do 3,300°C, a spalanie jest całkowite i zupełne (Jones, 1996; Leite, Ferreira i Carvalho, 1996; Jones, 1999; Ferrero, Beckmann-Kluge, Schmidtchen i Holtappels, 2010).

Acetylen magazynowany w butlach może eksplodować bez obecności tlenu. Dzieje się tak na skutek jego znacznej reaktywności spowodowanej nietrwałością potrójnego wiązania pomiędzy atomami węgla. W odpowiednich warunkach ciśnienia i temperatury pod wpływem oddziaływania inicjatora reakcji spalania np. w postaci iskry, małego płomienia lub uderzenia mechanicznego (wstrząsu lub upadku butli) może nastąpić reakcja rozkładu acetyleny, której produktami są wodór i sadza. W temperaturach powyżej 400°C dekompozycja acetyleny może zostać zapoczątkowana bez udziału inicjatora reakcji spalania. Pod wpływem oddziaływania bodźca energetycznego (np. w postaci iskry, małego płomienia lub uderzenia mechanicznego – wstrzą-

su), a przy ciśnieniu atmosferycznym rozkład acetyleny może nastąpić już w temperaturze z zakresu 180–190°C. W wyniku rozkładu acetyleny wydzieła się ciepło przyspieszające reakcję, powodując gwałtowny wzrost ciśnienia mogący doprowadzić do rozsadenia butli. W wyniku rozsadenia butli, na skutek obecności tlenu z powietrza, reakcja przechodzi w deflagracyjne lub detonacyjne spalanie wodoru oraz cząsteczek acetyleny, które nie uległy rozkładowi. Ciepło spalania wodoru mieści się w przedziale 120–142 MJ·kg⁻¹ i jest ponad 2 razy większe od ciepła spalania acetyleny (Michalik, 2011).

Magazynowanie acetyleny

Ze względu na swoje szczególne właściwości i zagrożenia, jakie może powodować acetylen, gaz ten jest magazynowany w specjalnych butlach (znakowanych kolorem kasztanowym lub żółtym wg starych standardów) wyposażonych w odpowiednie systemy zabezpieczeń, których zadaniem jest stworzenie odpowiednich warunków bezpieczeństwa podczas ich eksploatacji. W celu bezpiecznego zmagazynowania jak największej ilości acetyleny, gaz ten przechowuje się w butlach najczęściej w postaci rozpuszczonej. Acetylen dzięki swojej szczególnej strukturze słabo rozpuszcza się w wodzie i innych rozpuszczalnikach o budowie polarnej. Najbardziej rozpowszechnionym rozpuszczalnikiem dla acetyleny jest aceton C₃H₆O (w mniejszym stopniu stosuje się także dimetyloformamid – tzw. DMF C₃H₇NO). W temperaturze 20°C oraz przy ciśnieniu 1013,25 hPa rozpuszczalność acetyleny

w wodzie wynosi ok. 1185 mg·dm⁻³. W takich samych warunkach ciśnienia i temperatury jego rozpuszczalność w acetonie jest prawie 22 razy większa i wynosi ok. 25 920 mg·dm⁻³. Rozpuszczalnik pełni funkcję ochronną polegającą na opóźnianiu rozwoju reakcji rozkładu i transportu ciepła pomiędzy acetylenem w stanie wolnym a rozpuszczonym (Mizutani, Miyake i Matusi, 2007).

Badania eksperymentalne w pełnej skali

Uznaje się, że przy wartościach temperatury powyżej 65°C przestrzeń bezpieczeństwa w porach zanika, a wewnątrz butli panuje ciśnienie hydrostatyczne. W takim przypadku obniżenie temperatury butli poprzez schłodzenie spowoduje spadek ciśnienia w jej wnętrzu. Jeżeli natomiast wewnątrz butli zapoczątkowana została reakcja rozkładu acetyleny, nastąpił wzrost ciśnienia, to w konsekwencji wybuch butli, może nastąpić nawet po usunięciu butli ze strefy oddziaływania termicznego oraz jej schłodzeniu. Problem tkwi w tym, że nie ma jednoznacznego sposobu na stwierdzenie, czy rozkład gazu nastąpił, czy nie, dlatego podczas tego typu zdarzeń należy postępować niezwykle ostrożnie. Należy także pamiętać, że w warunkach, gdy butla z acetylenem została narażona na oddziaływanie pożaru lub podwyższonej temperatury, każda próba jej przemieszczania może zainicjować w niej egzotermiczna reakcję. Jeżeli butla w wyniku zdarzenia uległa rozszczelnieniu (w stopniu niewielkim) oraz gdy zapoczątkowana została w niej reakcja

rozkładu, ryzyko wybuchu wzrasta, ponieważ transport ciepła do cząstek gazu, które nie uległy rozkładowi (a tym samym dalszy wzrost ciśnienia), zostanie przyspieszony na skutek ruchu gazu oraz jego uwalniania się przez powstałą nieszczelność. Objętość fazy gazowej nazywana jest przestrzenią bezpieczeństwa i pełni funkcję ochronną w przypadku narażenia butli na działanie podwyższonej temperatury, która oprócz możliwości zainicjowania reakcji rozkładu acetyleny powoduje także rozszerzanie się ciekłego acetonu.

W tabeli ukazano zbiorcze wyniki z badań z udziałem nieosłoniętych butli z acetylenem przeprowadzonych na poligonie w Toruniu. Jak wynika z danych z tabeli, butle ulegały rozerwaniu lub przestrzeleniu w stosunkowo krótkim czasie 5–6 min a maksymalnie 10 min w zależności od ekspozycji zewnętrznej. Podczas podgrzania butli w rozlewisku mieszaniny (benzyna olej 2 : 1, samoistny nastąpił po 5 min przy ciśnieniu na butli 37 bar, a płaszcz butli został rozerwany na całej długości a butla w stosunku do miejsca eksperymentu przemieściła się na dystans 64 m. W odległości 52 m nastąpiło odbicie butli od podłoża. Wiązki butli rozrywały się po 7 min od początku ogrzewania.

Przykładowe zdjęcia z badań ukazano na rysunkach 1 i 2.

Zdarzenia z udziałem butli acetylenowych narażonych na działanie pożaru niosą ze sobą niebezpieczeństwo, którego skutki ciężko jest przewidzieć. Butle mogą być wyrzucone na odległość nawet 200 m, a odłamki nawet dalej do 300 m. Stąd też ratownicy muszą postępować niezwykle ostrożnie oraz stosować wszelkie dostępne środki bezpieczeń-

stwa. Postępowanie ratownicze w przypadku wystąpienia sytuacji awaryjnych z udziałem butli acetylenowych zależy od rodzaju danego zdarzenia. Jeśli podczas zdarzenia gaz ulatnia się z butli bez jego zapalenia, należy w miarę możliwości jak najszybciej ostrożnie zakręcić zawór, aby uniknąć zapłonu zgromadzonej mieszaniny wybuchowej. Z kolei gdy gaz wydobywa się z butli przez zawór i spala się, należy sprawdzić, czy powstały płomień powoduje nagrzewanie się płaszcza butli. Jeśli butla jest zimna i jeśli jest to możliwe, należy zamknąć zawór i przetransportować ją w bezpieczne miejsce (Skulich, Półka i Salamonowicz, 2012a, b). Kiedy butla narażona jest na działanie pożaru lub innego źródła ciepła bądź jeśli nie wiadomo, czy była poddana intensywnemu działaniu strumienia ciepła, należy ewakuować ludzi z obszaru o promieniu od 150 do 300 m. Ratownicy nie powinni zbliżać się do butli ani jej ruszać. Należy przez minimum 1 h chłodzić butlę strumieniem wody – wykonując to zza zasłony lub przeprowadzając to w stanowisku bezobsługowym. Chłodzenie należy przerwać po 1 h i obserwować, czy z powierzchni butli unosi się para wodna i powierzchnia butli pozostaje mokra. Jeśli para wodna unosi się, a powierzchnia nie pozostaje mokra, należy chłodzić butlę przez kolejne 0,5 h, po czym ponownie dokonać kontroli. Należy chłodzić butlę aż do skutku. Jeśli butla pozostaje mokra, należy sprawdzić, czy na całej powierzchni pozostaje zimna i czy w wyniku pożaru nie wystąpił wyciek, następnie odczekać 0,5 h i skontrolować stan butli jeszcze raz. Jeśli butla pozostaje zimna i nie ma wycieku gazu, należy zanurzyć ją na 24 h w zbiorniku z wodą. W przeciwnym wypadku

TABELA. Zbiornice zestawienie wyników badań z udziałem nieosłoniętych butli i wiązek acetyleny przeprowadzonych na poligonie w Toruniu (badania własne)
 TABLE. Comprehensive summary of results of tests involving uncovered acetylene cylinders and bundles carried out on the training ground in Toruń (own research)

Acetylen Acetylene	Rodzaj grzania Type of heating	Czas grzania do wybuchu/ neutraliza- cji Heating time for explosion/ neutraliza- tion	Ciśnienie początkowe Initial pressure [bar]	Ciśnienie końcowe Final pressure [bar]	Wybuch/ neutrali- zacja Explosion/ neutraliza- tion	Ilość odłamków i zasięg max. Number of fragments and range max [m]	Spostrzeżenia Observations
Pojedyncza butla Single cylinder	4P	5'36"	16	28	W	0/0	Ściana boczna butli uległa rozerwaniu na długości ok. 30 cm The side of the cylinder was torn over a length of ca. 30 cm long
	B	5"	16	39	W	1/64	Butla odbiła się od gruntu w odległości 52 m The cylinder bounced off the ground at a distance of 52 m
	4P	10'50"	12	29	W	0/0	Niewielkie pęknięcie ścianki butli A small crack of the cylinder wall
	4P	6'27"	11	31	P	0/0	Niewielkie otwory w płaszczu Small holes in the cylinder wall
4 butle z acetylenem w wiązce 4 acetylene bottles in bundle	B	6'00" +	15	22	W	0/0	Butle pozostały w ramie wiązki Cylinders remained in the bundle frame
	B	7'00" +	15.5	20	P+P+W+W	3/42	Dwie butle zostały wyrwane z ramy Two bottles were removed from the frame
Tlen + acetylen (oxygen and acetylene)	B	3'28"	C ₂ H ₂ – 21	C ₂ H ₂ – 28	P+P	C ₂ H ₂ – 1 / 92	Niewielkie otwory w płaszczu z acetylenem, butla z tlenem duży otwór została odrzucona na odległość 90 m Small holes in the acetylene cylinder wall, a large hole in the oxygen cylinder, it was ejected to a distance of 90 m

2P – grzanie dwoma palnikami, 4P – grzanie czterema palnikami, B – grzanie w rozlewisku benzyny, P – neutralizacja za pomocą przestrzeleń, W – wybuch.
 2P – heating with two burners, 4P – heating with four burners, B – heating in gasoline spill, P – neutralization by shooting, W – explosion.



RYSUNEK 1. Wygląd butli z acetylenem po wybuchu (badania własne)

FIGURE 1. Acetylene cylinder after explosion (own research)



RYSUNEK 2. Widok wiązki z acetylenem (badania własne)

FIGURE 2. Acetylene bundle (own research)



RYSUNEK 3. Widok butli z acetylenem po przestrzeleniu (badania własne)

FIGURE 3. Acetylene cylinders after shooting (own research)

należy od czasu do czasu ochładzać butlę przez 24 h, dokonując jednocześnie kontroli parowania. Jak pokazują badania poligonowe, bardzo dobrym sposobem

na neutralizację zagrożenia spowodowanego przez butle i wiązki acetylenowe jest ich przestrzelenie. Dla strzelca są one (przy dobrej widoczności) stosunkowo łatwym celem, a proces zlikwidowania zagrożenia spowodowanego przez zapalony strumień (*jet fire*) wydzielonego pod wysokim ciśnieniem gazu trwa ok. 10–15 min. Zwiększenie liczby otworów w przestrzelonym płaszczu butli zdecydowanie skraca czas emisji gazu. Gaz emitowany z butli przestrzelonej będzie wydobywał się nawet przez kilka dni i najlepszym sposobem na jego usunięcie jest jego spokojne wypalenie (rys. 3).

Wnioski

Każde zdarzenie, w którym butle z acetylenem poddane zostały zwiększonemu oddziaływaniu termicznemu lub oddziaływaniu mechanicznemu, niosą ze sobą zagrożenie, którego skutki ciężko jest przewidzieć. Kiedy butla narażona jest na działanie pożaru lub innego źródła ciepła bądź jeśli nie wiadomo, czy była poddana działaniu strumienia ciepła o dużym natężeniu, należy przeprowadzić ewakuację ludzi z obszaru o promieniu od 150 do 300 m. Zasięg obszaru ewakuacji jest uwarunkowany miejscem występowania butli zagrożonych wybuchem. Gdy butle są zlokalizowane na zewnątrz pomieszczeń, promień strefy niebezpiecznej powinien wynosić 300 m. Ratownicy nie powinni zbliżać się do butli ani jej ruszać. Należy przez minimum 1 h chłodzić butlę strumieniem wody aż do skutku. Jeśli butla pozostaje mokra, należy sprawdzić, czy na całej powierzchni pozostaje zimna i czy w wyniku pożaru nie wystąpił wyciek,

następnie odczekać 0,5 h i dokonać ponownej kontroli. Jeśli butla pozostaje zimna i nie ma wycieku gazu, należy zanurzyć ją na 24 h w zbiorniku z wodą. W przeciwnym wypadku należy od czasu do czasu ochładzać butlę przez 24 h, dokonując jednocześnie kontroli parowania.

Przeprowadzone badania wykazały, że metoda ofensywna polegająca na przestrzeleniu butli jest zawsze skuteczna i nigdy nie powoduje skutków gorszych niż wybuch butli, w stosunku do której nie podjęto działań neutralizacyjnych. Określono, że przy odległości strzału do 200 m pozytywny efekt neutralizacji osiągany jest przy zastosowaniu karabinów kal. 308 Win oraz kal. 338 Lapua Magnum. Butle, co do których nie podjęto działań neutralizacyjnych, rozrywały się wzdłużnie i przemieszczały się na odległość do 90 m, stanowiąc bardzo duże zagrożenie dla osób i obiektów znajdujących się na ich drodze. Wszystkie butle z acetylenem rozrywały się przy ciśnieniu poniżej 40 bar. Rozerwaniu butli acetylenowych towarzyszyło powstanie kuli ognistej o średnicy do ok. 15 m. Neutralizacja poprzez przestrzelenie za każdym razem zapobiegała wybuchowi i ograniczała oddziaływanie termiczne do płomienia typu *jet fire* o długości ok. 3 m. Podczas prowadzenia działań ratowniczych należy postępować niezwykle ostrożnie oraz stosować wszelkie dostępne środki bezpieczeństwa. Każdy ratownik powinien być wyposażony w kompletne ubranie specjalne. W strefie o promieniu 30 m od butli z acetylenem każdy ratownik powinien być wyposażony w sprzęt ochrony dróg oddechowych.

Literatura

- Babrauskas, V. (2001). *Ignition Handbook: Principles and application to fire safety engineering fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah, WA, USA: Fire Science Publishers.
- Blanchard, R., Fletcher, J., Hill, D., Jagger, S. i Pitchard, D. (2007). *Safety of acetylene containing cylinders during and after involvement in a fire*. Pobrano z lokalizacji The National Archives: <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20120919214604/http://www.communities.gov.uk/documents/fire/pdf/319912.pdf>
- Ferrero, F., Beckmann-Kluge, M., Schmidtchen, U. i Holtappels, K. (2010). Modeling of heat transfers in acetylene cylinders during and after the exposure to fire. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 654-661.
- Jones, B. (1996). Acetylene cylinders – a Swedish approach. *Fire Engineers Journals*, 1, 23-28.
- Jones, B. (1999). Home office procedure for dealing with acetylene cylinders in fire, *Fire Research and Management*, 4, 45-49.
- Michalik, T. (2011). Acetylen – etyn – narcylen. *W Akcji*, 2, 14-17.
- Mizutani, T., Miyake, A. i Matusi, H. (2007). Decomposing deflagration properties of acetylene under low temperatures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(4-6), 688-690.
- Leite, A.O.P., Ferreira, M.A. i Carvalho, J.A. (1996). An investigation of multiple jet acetylene flames. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 23(7), 957-970.
- Price, J.W.H. (2006). An acetylene cylinder explosion: a most probable cause analysis. *Engineering Failure Analysis*, 23(4), 705-715.
- Skulich, M., Półka, M. i Salamonowicz, Z. (2012a). Acetylen, cz. 1 – niebezpieczeństwo ukryte w porach. *Przegląd Pożarniczy*, 8, 3-9.
- Skulich, M., Półka, M. i Salamonowicz, Z. (2012b). Acetylen, cz. 2 – niebezpieczeństwo ukryte w porach. *Przegląd Pożarniczy*, 9, 7-12.

Adnotacja

Artykuł został opracowany w ramach projektu na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa DOB-BIO6/02/50/2014 pt.: „Opracowanie metod neutralizacji zagrożenia wybuchu wytypowanych zbiorników z gazami technicznymi, w tym alternatywnymi źródłami zasilania w środowisku pożarowym na potrzeby ratowników biorących udział w akcjach ratowniczo-gaśniczych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Streszczenie

Butle i wiązki acetylenowe w warunkach pożaru. Celami artykułu są przedstawienie właściwości pożarowo-wybuchowych acetyleny, wymagań w zakresie magazynowania i transportowania tego gazu oraz ukazanie zestawienia wyników badań przeprowadzonych na poligonie z udziałem pojedynczych butli i wiązek acetylenowych. Zasięg strefy niebezpiecznej podczas działań ratowniczych udziałem butli acetylenowych,

występujących na otwartym terenie, powinien wynosić minimum 300 m. Podczas prowadzenia działań ratowniczych należy postępować niezwykle ostrożnie oraz stosować wszelkie dostępne środki bezpieczeństwa.

Summary

Acetylene cylinders and bundles under fire conditions. The purpose of this article is to present fire and explosion properties of acetylene, the requirements for storing and transporting this gas, and to present the results of tests conducted on single acetylene cylinders and on cylinder bundles. Hazardous area coverage during rescue operations involving acetylene cylinders in open areas should be at least 300 m. Care must be taken when handling rescue operations and all available safety measures should be used.

Authors' address:

Marzena Pólka
Szkoła Główna Służby Pożarnej
Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego
ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa
Poland
e-mail: mpolka@sgsp.edu.pl