

dr inż. Wojciech Pawłowski

Politechnika Warszawska

URZĄDZENIA I MATERIAŁY WYBUCHOWE

Explosive devices and materials

Historia materiałów wybuchowych

Pierwszym materiałem wybuchowym w historii świata wynalezionym prawdopodobnie w VI w. w Chinach był proch czarny, inaczej zwany dymnym. Jest to obrobiona technologicznie mieszanina saletry potasowej, siarki i węgla drzewnego, który to nadaje czarną barwę produktowi. Do połowy XIX w. był uniwersalnym materiałem wybuchowym stosowanym do inicjowania, miotania i kruszenia. Dzisiaj nadal ma zastosowanie w produkcji zarówno wojskowej, jak i cywilnej. Przełomem w rozwoju broni palnej było zastosowanie na początku XIX w. spłonki zapalającej zawierającej piorunian rtęci i od połowy XIX w. prochów bezdymnych opartych na bazie nitrocelulozy. Dzięki temu wzrosła donośność, celność i szybkostrzelność broni. Po odkryciu, że kwas pikrynowy, stosowany jako żółty barwnik, jest silnym materiałem wybuchowym, użyto go do napełniania pocisków, zwiększając siłę ognia artylerii. Na przełomie XIX i XX w. kwas pikrynowy zastąpiono trotylem, który okazał się bezpieczniejszy w operowaniu. Wynalazki Alfreda Nobla w II połowie XIX w. to spłonka pobudzająca oraz przemysłowa produkcja nitrogliceryny i dynamitu, które przyczyniły się do masowego użycia materiałów wybuchowych przy budowie tuneli, kanałów i dróg. W I połowie XX w. zastosowano efekt kumulacji wybuchowej w pociskach przeciwpancernych, do których użyto silnych materiałów wybuchowych, takich jak pentryt, heksogen czy oktogen. W tym samym czasie także rozwinięto produkcję stałych jednorodnych i złożonych paliw raketowych do broni dalekiego zasięgu. W latach 50. XX w. zastosowano mało wrażliwe, bezpieczne górnicze materiały wybuchowe na bazie saletry amonowej, takie jak ANFO czy zawieszinowe, natomiast w latach 70. powstały emulsyjne materiały wybuchowe. W tym czasie także otrzymano termostabilne materiały wybuchowe, w szczególności na potrzeby górnictwa naftowego, a obecnie wdrażane są dla techniki wojskowej materiały wybuchowe mocne

(np. CL-20), mało wrażliwe (np. TEX), a także wielobazowe, mało wrażliwe prochy LOVA¹.

Dokonywanie przestępstw za pomocą materiałów wybuchowych

Popularnym sposobem dokonywania przestępstw są działania z użyciem materiałów wybuchowych. Przyjmuje się, że obecnie około 90% zamachów terrorystycznych to zamachy bombowe. Naśladując terrorystów, materiałami wybuchowymi zaczęli posługiwać się także zwykli przestępcy (kryminaliści), głównie ze zorganizowanych grup zbrojnych.

Przestępcy (w tym terroryści) posługują się nimi z różnych pobudek. Najczęstsze to polityczne, o podłożu nacjonalistycznym lub religijnym, kryminalne (ekonomiczne) i o przyczynach patologicznych. W Polsce mamy najczęściej do czynienia z aktami terroru kryminalnego, dokonywanymi przeważnie w celu wzbudzenia strachu, a przez to osiągnięcia swoich celów, np. wymuszenia haraczku, likwidacji członków konkurencyjnej grupy itp. Użycie materiałów wybuchowych oprócz spektakularnego działania jest spowodowane także stosunkowo łatwym dostępem, przystępną ceną, łatwością przenoszenia i stosowania².

Źródła i sposoby pozyskiwania materiałów wybuchowych dla celów przestępczych

Istnieje wiele sposobów i źródeł pozyskiwania materiałów wybuchowych do celów przestępczych. Jako sposób wejścia w ich posiadanie można wymienić między innymi kradzież. Materiały wybuchowe można pozyskać ze wszystkich miejsc, gdzie one występują, a więc tam, gdzie są badane, produkowane, przechowywane, używane i niszczone. Do miejsc takich można zaliczyć zakłady wytwarzające materiały wybuchowe, placówki naukowo-badawcze, jednostki wojskowe, poligony i place ćwiczeń, jednostki policji i innych służb, kopalnie i kamieniołomy, siedziby firm wyburzeniowych i oczyszczania terenu z przedmiotów niebezpiecznych, nadleśnictwa, huty i hurtownie pirotechniczne.

Innym, rzadziej spotykanym sposobem wejścia w posiadanie materiałów wybuchowych jest ich samodzielna produkcja. Część materiałów samodiało-

¹ B. Zygmunt (red.), A. Maranda, D. Buczkowski, *Materiały wybuchowe trzeciej generacji*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2007.

² P. Brzezinka, *Analiza możliwości pozyskiwania materiałów wybuchowych z wyrobów wojskowych pochodzenia wojennego do konstrukcji samodiałowych urządzeń wybuchowych*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2005.

wych jest łatwa do sporządzenia, a instrukcje ich wykonania stosunkowo łatwo pozyskać np. w Internecie.

W warunkach polskich szczególnie charakterystyczne jest pozyskiwanie materiałów wybuchowych z wyrobów pochodzenia wojennego. Statystyki policyjne wskazują, że aż 70–80% „bomb” wyprodukowanych domowym sposobem w celach przestępczych wypełnionych jest materiałem odzyskanym z amunicji i wojennych urządzeń wybuchowych, znalezionych na byłych pobjawiskach³.

Materiały wybuchowe

Materiały wybuchowe są to związki chemiczne lub ich mieszaniny w postaci stałej lub ciekłej, w których pod wpływem zewnętrznego impulsu energetycznego o odpowiedniej intensywności rozwija się szybka egzotermiczna reakcja chemiczna z wydzieleniem dużych ilości produktów gazowych o bardzo wysokiej temperaturze. Impuls energetyczny może być mechaniczny (tj. uderzenie, tarcie, nakłucie), cieplny (tj. płomień, rozżarzony przedmiot), wybuchowy (detonacja innego materiału wybuchowego, silna fala uderzeniowa) lub elektryczny (iskra elektryczna). Zainicjowana w materiale wybuchowym egzotermiczna reakcja chemiczna rozprzestrzenia się samorzutnie na całą jego objętość. Liniowa prędkość przebiegu reakcji chemicznej w materiale wybuchowym pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym wynosi od mm/s dla mieszanin pirotechnicznych lub paliw raketowych i prochów do ponad 9 km/s w przypadku detonacji np. oktogenu. Właściwości wybuchowe są cechą wielu różnych związków chemicznych z grupy organicznych estrów kwasu azotowego (np. nitrogliceryna, nitroglukol, nitroceluloza, pentryt), związków nitrowych aromatycznych (np. trotyl, kwas pikrynowy, kwas styfniowy, heksyl, heksanitrostilben), związków nitrowych alifatycznych (np. nitrometan, nitroform, tetranitrometan), nitroamin (np. heksogen, oktogen, nitroguanidyna, heksanitroheksaazaizowurzitan) oraz azydków i piorunianów metali ciężkich (np. ołowiu i rtęci) i innych substancji organicznych mających w swojej strukturze chemicznej grupy eksplozoforowe takie jak azotanowa ($-\text{NO}_3$), nitrowa ($-\text{NO}_2$), nitrozowa ($-\text{NO}$), hydroksyaminowa ($-\text{NHOH}$), diazowa ($-\text{N}_2$), azowa ($-\text{N}=\text{N}-$), azydkowa ($-\text{N}_3$), nadtlenkowa ($-\text{O}-\text{O}-$), acetylenowa ($-\text{C}\equiv\text{C}-$), chlorynowa ($-\text{ClO}_2$), chloranowa ($-\text{ClO}_3$) lub nadchloranowa ($-\text{ClO}_4$). Materiałami wybuchowymi mogą być również mieszaniny dwóch lub więcej niewybuchowych składników, z których jeden jest utleniaczem, a drugi substancją palną. Właściwości wybuchowe ma także wiele mieszanin gazowych i aerozolo-

³ W. Pawłowski, A. Radomski, *Inicjujące materiały wybuchowe jako istotne składniki samodzielnego urzędów wybuchowych*, „Problemy Kryminalistyki” 2006, nr 251, s. 18–33.

wych, aczkolwiek zgodnie z obecnie obowiązującą ustawową definicją nie zaliczają się one do materiałów wybuchowych. Podczas przemiany wybuchowej 1 kg materiału wybuchowego wydziela się energia od ok. 2000 do ok. 6000 kJ. Powstające gazy mają temperaturę dochodzącą do 4500 K, a objętość gazów (sprowadzona do warunków normalnych) wynosi od 300 do 900 litrów⁴.

W zależności od zastosowania rozróżnia się materiały wybuchowe inicjujące (pierwotne), kruszące (wtórne) oraz miotające. Oddzielną grupę stanowią mieszaniny pirotechniczne.

Inicjujące materiały wybuchowe wykorzystuje się do zapoczątkowania palenia (w spłonkach zapalających i zapłonnikach) lub detonacji (w spłonkach pobudzających i zapalnikach). Ulegają one przemianie chemicznej zainicjowanej impulsem o małej energii, takim jak nakłucie iglicą w spłonkach zapalających, mały płomień w spłonkach pobudzających lub rozżarzony drut elektryczny. Czas narastania parametrów przemiany (ciśnienia, prędkości) do wartości maksymalnych jest niezwykle krótki, a zapłon lub detonację można uzyskać nawet w ładunku o masie kilku miligramów. Najczęściej stosowane to: piorunian rtęci, azydek ołowiu, trinitrorezorcynian ołowiu, tetrazen oraz mieszaniny chloranu potasu ze związkami nieorganicznymi, np. w spłonkach zapalających.

Materiały inicjujące fabrycznie wyprodukowane praktycznie nie występują w formie wolnej, lecz tylko w formie użytkowej, tzn. zaelaborowane np. w spłonkach zapalających lub pobudzających. Jeśli materiał inicjujący ujawniony zostanie w formie wolnej, to najprawdopodobniej został on wytworzony samodiałowo. Poniżej na ryc. 1–3 pokazano formy użytkowe dla materiałów wybuchowych inicjujących.

Kruszące materiały wybuchowe cechuje znacznie mniejsza wrażliwość, są bardziej bezpieczne w produkcji i stosowaniu. Produkowane są w skali wielu milionów ton rocznie. Podstawowym rodzajem przemiany wybuchowej jest detonacja, którą można wywołać stosunkowo dużym impulsem energetycznym, np. spłonką pobudzającą lub detonatorem. **Wojskowe kruszące materiały wybuchowe** to głównie substancje jednoskładnikowe, takie jak trotyl, heksogen, oktogen, pentryt, TATB i wiele innych związków nitrowych lub ich wzajemne mieszaniny z niewielkimi ilościami różnych dodatków zmniejszających ich wrażliwość i zwiększających trwałość chemiczną, a także nadających odpowiednią formę (plastyczną, prasowaną lub odlewaną). Kruszącymi mate-

⁴ T. Urbański, *Chemia i technologia materiałów wybuchowych*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa 1954.

riałami wybuchowymi napełniane są bomby lotnicze, pociski, głowice raket, torpedy, miny, granaty itp.

Ryc. 1. Zapalnik lontowy (spłonka z lontem)



Źródło: archiwum autora⁵.

Ryc. 2. Zapalnik elektryczny górniczy



Ryc. 3. Zapalnik mechaniczny wojskowy



Górnice kruszące materiały wybuchowe są przeważnie mieszaninami wieloskładnikowymi, w których skład wchodzi substancje utleniające (azotan amonu, azotan potasu, azotan sodu itp.), paliwa (woski mineralne, proszki metali takie jak glin i in.) i uczulacze w postaci nitrowiązków organicznych (ni-

⁵ Wszystkie zdjęcia zamieszczone w artykule pochodzą z archiwum własnego autora.

trogliceryna, nitroglikol, nitroceluloza, trotyl, dwunitrotolueny itp.). Materiały te mają niższe parametry wybuchu, niewystarczające do niszczenia konstrukcji stalowych, lecz wystarczające do efektywnego kruszenia skał. Stosowane są masowo przy wydobyciu surowców mineralnych, budowie tuneli, dróg, kanałów i niszczeniu niepotrzebnych obiektów budowlanych⁶.

Ryc. 4. Górniczy materiał wybuchowy



Ryc. 5. Plastyczny materiał wybuchowy



Ryc. 6. Wojskowy materiał wybuchowy



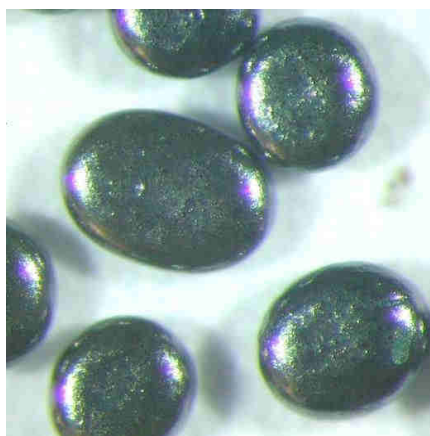
⁶ S. Cudziło, A. Maranda, J. Nowaczewski, R. Trębiński, W.A. Trzciński, *Wojskowe materiały wybuchowe*, WMiIM Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2000.

Miotające materiały wybuchowe służą do nadania dużej prędkości pociskom (prochy) lub rakietom (paliwa raketowe). Miotające materiały wybuchowe nie mogą ulegać detonacji, lecz wyłącznie deflagracji polegającej na warstwowym paleniu z prędkością zwykle od kilku mm do kilku cm/s, w zależności od ciśnienia. Ponieważ prochy mają postać ziaren o różnych kształtach (rurki, płytki, kulki, wielokanalikowe walce), powierzchnia palenia jest bardzo duża, a ciśnienie w lufie broni dochodzi do kilkuset MPa. Paliwa raketowe palą się pod ciśnieniem rzędu 10 MPa. Najbardziej rozpowszechnione są prochy nitrocelulozowe (zawierają min. 95% nitrocelulozy) i nitroglicerynowe (oprócz nitrocelulozy zawierają kilkadziesiąt procent nitrogliceryny), zwane bezdymnymi, ponieważ w odróżnieniu od prochu czarnego podczas wystrzału powstaje minimalna ilość dymu.

Ryc. 7. Ziarna prochu bezdymnego siedmiokanalikowego do amunicji artyleryjskiej



Ryc. 8. Ziarna prochu bezdymnego kulkowego do amunicji strzeleckiej



Ryc. 9. Ziarno paliwa raketowego wraz z inhibitorem



Mieszanki pirotechniczne składają się z co najmniej dwóch składników, nieorganicznego utleniacza (chlorany, nadchlorany, azotany, tlenki i nadtlenki metali i in.) oraz substancji palnej, takiej jak np. magnez, aluminium, cyrkon, bor, krzem lub związki organiczne, jako lepiszcza (szelak, iditol, kalafonia, PCV, teflon i inne żywice i polimery), a także – dla efektów specjalnych – z dodatków w postaci sublimujących barwników lub substancji o działaniu łzawiącym. Dodatek kilku procent lepiszcza umożliwia otrzymanie odpowiedniej formy użytkowej w postaci np. wytrzymałych kształtek przez zaprasowanie. Podstawowym rodzajem przemiany tych mieszanin jest deflagracja z prędkością od ułamka mm/s do wielu m/s. Celem stosowania mieszanin pirotechnicznych jest wytworzenie m.in. efektu oświetlającego, dymnego, zapalającego, akustycznego, sygnalizacyjnego, łzawiącego lub kombinacji tych efektów w celach widowiskowych lub pozoracji pola walki oraz ćwiczeń poligonowych. Poniżej pokazano wyroby pirotechniki cywilnej profesjonalnej i amatorskiej oraz wyroby pirotechniki wojskowej⁷.

Urządzenia wybuchowe

Improwizowane urządzenie wybuchowe (IUW) – przyjęte według obowiązujących obecnie standardów w państwach NATO – to urządzenie wykonane w sposób improwizowany, zawierające niszczące, śmiertelne, szkodliwe środki pirotechniczne lub zapalające środki chemiczne przeznaczone do niszczenia, unieszkodliwiania, nękania lub odwracania uwagi. Może zawierać woj-

⁷ A. Szydłowski, *Podstawy pirotechniki*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa 1957.

skowe lub górnicze materiały wybuchowe, ale zwykle konstruowane jest z elementów pochodzących z innych źródeł.

Improwizowane urządzenie wybuchowe jest to wyrób rażący obiektu, w których okolicy się znajduje, o różnego typu budowie, ilości materiału wybuchowego, substancji lub innego stworzonego układu zdolnego do wykonania pracy w postaci wybuchu, mający urządzenie służące do zapoczątkowania łańcucha ogniowego lub innego układu sterującego⁸.

Ryc. 10. Wyroby cywilnej pirotechniki profesjonalnej



Ryc. 11. Wyroby cywilnej pirotechniki amatorskiej



⁸ R. Terela, *Analiza urządzeń wybuchowych stosowanych w zamachach bombowych na osoby chronione*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2005.

Ryc. 12. Wyroby wojskowej pirotechniki pozoracji pola walki

Podział improwizowanych urządzeń wybuchowych ze względu na sposób działania

Urządzenia wybuchowe muszą zawierać określony element – nazywany potocznie zapalnikiem, który musi wytworzyć impuls na spłonkę, tj. zapoczątkować proces łańcucha ogniowego. Proces może być zapoczątkowany w następujący sposób:

1. mechaniczny – polega najczęściej na zbitiu spłonki,
2. elektryczny – polega na wytworzeniu np. impulsu termicznego wywołanego zamknięciem obwodu elektrycznego z elementem zapłonowym,
3. chemiczny – polega na reakcjach egzotermicznych związków chemicznych z wytwarzaniem dużej ilości ciepła w dość krótkim czasie,
4. ogniowy – polega na oddziaływaniu ognia, pochodzącego np. z mieszaniny pirotechnicznej lub środka zapłonowego w postaci lontu lub stopiny.

Spłonka pobudzająca, detonując pod wpływem jednego z wyżej wymienionych, określonych impulsów, doprowadzi do zainicjowania detonacji ładunku materiału wybuchowego w improwizowanym urządzeniu wybuchowym. Powyższy podział nie definiuje sposobu działania ze względu na bodźce pochodzące z zewnątrz improwizowanego urządzenia wybuchowego, określa tylko sposoby rozpoczęcia łańcucha ogniowego wewnątrz „bomby”. Określenie sposobu działania „bomby” nie wyklucza użycia wszelkiego typu urządzeń włączających, zabezpieczających i uzbrajających zastosowanych pojedynczo lub w sposób zespolony.

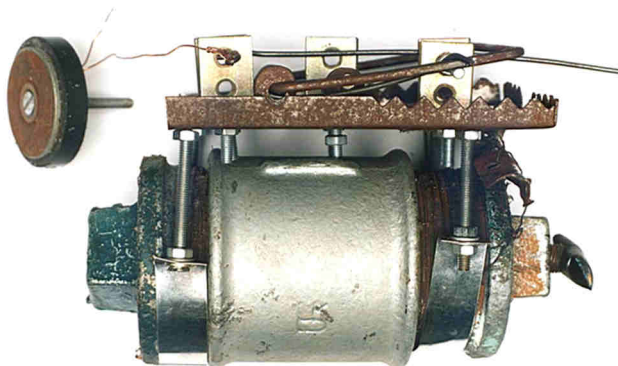
Urządzenie lub grupę urządzeń decydujących o sposobie działania „bomby” nazywamy układem sterującym. Ze względu na zastosowany układ sterujący improwizowane urządzenia wybuchowe dzielimy na trzy grupy:

1. pułapki – z układem sterującym uruchamianym przez ofiarę,
2. czasowe – z układem sterującym nastawnym czasowo,
3. sterowane – z układem sterującym bezpośrednio aktywowanym przez sprawcę.

Improwizowane urządzenia wybuchowe pułapki charakteryzują się głównie działaniem kontaktowym i w większości sytuacji są uruchamiane przez przypadkowe osoby.

Układ sterujący może być mechaniczny, elektroniczny, elektryczny lub chemiczny. Ogólną zasadą jest uruchomienie urządzenia w momencie nacisku, odciągnięcia naciągu, zwolnienia obciążenia, ruchu bezwładnościowego, uaktywnienia urządzenia ultradźwiękowego, przerwania wiązki podczerwieni lub lasera, zwarcia obwodu elektrycznego itp. W improwizowanych urządzeniach wybuchowych typu pułapka mogą być zastosowane również czujniki temperatury, ciśnienia, fal radiowych itp.

Ryc. 13. Samodziałowe urządzenie wybuchowe typu „pułapki” działające na naciąg



W improwizowanych urządzeniach wybuchowych czasowych układ sterowania nadaje określoną zwłokę od włączenia do zadziałania. Urządzenie o charakterze zwłocznym (zapalnik) działa po upływie określonego czasu. Do tego typu urządzeń zaliczane są zapalniki mechaniczne, pirotechniczne, elektroniczne i chemiczne. Zapalnik mechaniczny ma odpowiedni mechanizm ze-

garowy zapewniający żądany czas zwłoki do zadziałania. Może stanowić osobny układ sterujący pomiędzy zapalnikiem a źródłem zasilania lub integralną część zapalnika. Pirotechniczny zawiera określoną ścieżkę z masy prochowej lub pirotechnicznej, której spalanie określa czas zwłoki. Elektroniczny ma odpowiedni zegarowy układ elektroniczny zapewniający żądany czas zwłoki do zadziałania. W zapalniku chemicznym wymagany czas zwłoki uzyskuje się dzięki reakcji chemicznej w określonym czasie.

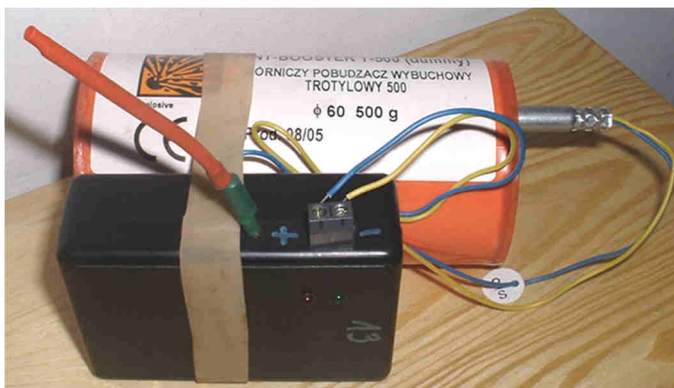
Ryc. 14. Samodziałowe urządzenie wybuchowe o działaniu zwłocznym opartym na zegarze kwarcowym



Do improwizowanych urządzeń wybuchowych sterowanych zalicza się te, które są pobudzone bezpośrednio przez zamachowca z określonej odległości od planowanego miejsca wybuchu bomby. Urządzenie wybuchowe w zależności od rodzaju zamachu zostanie odpalone w bezpiecznej odległości od celu ataku lub w bezpośrednim kontakcie z celem. Ten rodzaj sterowania zapewnia maksymalnie dużą skuteczność bomby. Urządzenia wybuchowe sterowane mogą być odpalane za pomocą urządzeń radiowych (najczęściej profesjonalne urządzenia nadawczo-odbiorcze stosowane w modelarstwie, krótkofalówki, zestawy samochodowych centralek alarmowych z pilotem), telekomunikacyjnych (odpowiednio spreparowane telefony komórkowe, pagery), optycznych i za pomocą przewodu elektrycznego zwanego dalej magistralą⁹.

⁹ A. Steckiewicz, *Aspekty niesprawności samodzielnych urządzeń wybuchowych na bazie przykładów praktycznych*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2004.

Ryc. 15. Samodziałowe urządzenie wybuchowe sterowane sygnałem przesyłanym falą radiową



Istotną grupą improwizowanych urządzeń wybuchowych sterowanych są te stosowane w zamachach samobójczych, w których bomba jest uruchamiana w momencie odciążenia naciągu, zwolnienia obciążenia lub zamknięcia obwodu elektrycznego¹⁰.

Wybuch

Wybuch to zjawisko szybkiej fizycznej, chemicznej lub jądrowej przemiany układu, której towarzyszy zamiana energii potencjalnej w pracę mechaniczną – niszczenie otaczającego środowiska (np. rozerwanie, rozłupanie, rozpylenie lub przemieszczenie otaczających przedmiotów). Zjawisku temu towarzyszy efekt akustyczny w postaci dźwięku, wizualny w postaci błysku i ewentualnie dymu.

Wybuch fizyczny (rozsadzenie) – gwałtowne wyrównanie różnicy ciśnień między wnętrzem zbiornika lub naczynia a jego otoczeniem, powodujące rozerwanie jego ścianek. Nie jest ono spowodowane reakcją chemiczną, lecz np. przegrzaniem wody lub gazu skroplonego do temperatury ponad krytycznej.

Wybuch chemiczny to szybkie (milisekundowe) egzotermiczne procesy chemiczne zachodzące w stałych i ciekłych materiałach wybuchowych (wybuch punktowy) oraz wybuchowych mieszaninach gazowych (wybuch przestrzenny).

¹⁰ S. Głos, *Budowa i zasada działania elementów zabezpieczających w samodziałowych urządzeniach wybuchowych*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2005.

Wybuch punktowy

Wybuch punktowy to określenie dla przemiany detonacyjnej lub deflagacyjnej substancji skondensowanej, czyli znajdującej się w stanie stałym lub ciekłym, i jest charakterystyczny dla materiałów wybuchowych. Wybuch taki zgodnie z mechanizmem przemiany detonacyjnej w dość szczególny sposób oddziałuje na przedmioty znajdujące się w jego pobliżu. Zależy to od wielu czynników, takich jak: rodzaj, ilość materiału wybuchowego i odległość danego przedmiotu (elementu) od epicentrum wybuchu, a także kształt i materiał, z jakiego zrobiony jest dany przedmiot.

Analizując fragmentację urządzenia wybuchowego po eksplozji, np. kruszącego materiału wybuchowego oraz otaczającego go środowiska, można pokusić się o oszacowanie i w miarę możliwości odtworzenie sytuacji tuż przed wybuchem.

Wyselekcjonowany materiał dowodowy ze względu na fragmentację można podzielić na trzy kategorie, tj. ten, który pochodzi z bezpośredniej bliskości materiału wybuchowego, i ten, który w czasie wybuchu był nieco oddalony od epicentrum, oraz taki, który był daleko.

Pierwszy najbliższy obszar wybuchu to **strefa kruszości**, która jest najmniejsza i przeważnie nie przekracza trzech promieni ładunku wybuchowego ($3r$) o kształcie kulistym (dla celów szacunkowych ta dokładność jest wystarczająca).

Druga strefa, większa od poprzedniej, to **strefa bliskiego oddziaływania wybuchu**. Granicę tej strefy można oszacować na podstawie promienia zredukowanego będącego parametrem we wzorze empirycznym Sadowskiego przy niezbędnym warunku, dla którego fala uderzeniowa propaguje się jeszcze z produktami wybuchu, wynoszącym ok. dwudziestu promieni ładunku wybuchowego ($20r$).

Trzeci, największy obszar to **strefa burząca**. Jej zasięg zależy od ilości użytego materiału wybuchowego oraz wytrzymałości na ciśnienie fali uderzeniowej obiektów znajdujących się w pobliżu. Rodzaj zniszczeń tych obiektów jest charakterystyczny dla nadciśnienia fali uderzeniowej.

Badania biegłego na miejscu zdarzenia lub w laboratorium polegają na dokładnym obejrzeniu każdego ujawnionego elementu pod kątem obecności śladów charakterystycznych dla działania wybuchu. Biegli w tym względzie powinni kierować się własnym doświadczeniem i wiedzą związaną z efektami niszczącego oddziaływania wybuchu. Detonujący materiał wybuchowy oddziałuje w różny sposób na przedmioty i przeszkody znajdujące się w jego pobliżu. Na przedmioty lub przeszkody będące w bezpośrednim kontakcie z detonują-

cym materiałem wybuchowym w strefie kruszności działa wysokie ciśnienie i temperatura wraz z produktami detonacji mającymi dużą gęstość. Powoduje to silne rozdrobnienie, poszarpanie, charakterystyczną deformację fragmentów przedmiotu, a w przypadku przeszkód ich perforację. Krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury dodatkowo przyczynia się do powstania uszkodzeń termicznych na elementach z tworzyw sztucznych i materii organicznej.

Strefa bliskiego oddziaływania wybuchu charakteryzuje się tym, że na przedmioty znajdujące się w jej zasięgu wpływ ma fala uderzeniowa propagująca wraz z produktami wybuchu o znacznie mniejszej gęstości. Fragmenty przedmiotów lub elementy przeszkód pochodzących z tej strefy oddziaływania nie mają uszkodzeń termicznych, są mniej poszarpane i rozdrobnione, widnieją na nich popękania i mechaniczne silne odkształcenia oraz wyraźne ślady dynamicznie naniesionych stałych produktów wybuchu, takie jak okopcenia, naloty, napylenia i zmatowienia.

Dalszy obszar charakteryzuje czyste oddziaływanie fali uderzeniowej – jest to strefa burząca. Przedmioty lub przeszkody znajdujące się w jej zasięgu ulegają głównie popękaniu, połamaniu lub pocięciu (blachy i tworzywa plastyczne) – na ich powierzchniach nie ma śladów stałych produktów wybuchu.

Na podstawie ujawnionych elementów, ich wyglądu, oceny uszkodzeń w aspekcie odległości, w jakiej się one mogły znajdować od detonującego ładunku materiału wybuchowego, można podjąć próbę np. rekonstrukcji urządzenia inicjującego, które przeważnie w urządzeniach wybuchowych znajdują się w strefie kruszności lub bliskiego oddziaływania wybuchu. Poniżej pokazano, jak na podstawie ujawnionych fragmentów urządzenia radiowego zidentyfikowano chemicznie nie tylko rodzaj użytego materiału wybuchowego, lecz także odtworzono wygląd i rodzaj odbiornika radiowego służącego do odpalenia ładunku wybuchowego¹¹.

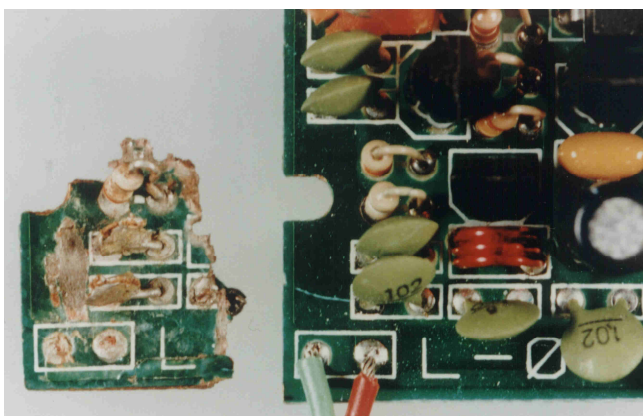
Stosowane materiały wybuchowe kruszące są zwykle pochodzenia wojskowego, górniczego lub samodiałowego.

Wojskowe kruszące materiały wybuchowe, głównie jedno- lub kilkuskładnikowe, charakteryzują się dużą mocą wybuchu i wysoką trwałością. Materiały te w odróżnieniu od górniczych materiałów wybuchowych mają ujemny bilans tlenowy i przez to w produktach wybuchu występuje dużo sadzy pochodzącej ze spalania się substancji pomocniczych oraz z samego materiału wybuchowego. W związku z tym fragmenty rozbitych wybuchem przedmiotów pochodzące ze strefy kruszności oraz bliskiego oddziaływania wybuchem mają na

¹¹ W. Pawłowski, *Wybrane zagadnienia związane z badaniem miejsc zamachów bombowych*, w: R. Bachliński, A. Policha (red.), *Fizykochemiczne badania śladów kryminalistycznych*, Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Policji, Warszawa 2013.

swoich powierzchniach większe lub mniejsze okopcenia. Materiały te cechuje duża moc, a co za tym idzie – duża kruszność. Pozostawią w epicentrum wybuchu, np. w leju, bardzo silnie zmielone podłoże. W niektórych przypadkach, szczególnie na podłożu piaszczystym, na niewielkiej głębokości pod lejem pozostanie po detonacji charakterystyczny zgniot, który wskazuje dokładne miejsce podłożenia ładunku wybuchowego.

Ryc. 16. Identyfikacja porównawcza fragmentu płytki elektronicznej ujawnionej na miejscu wybuchu z oryginalną płytką odbiornika radiosterowania



Górnictwo kruszące materiały wybuchowe, głównie wieloskładnikowe, mają mniejszą od wojskowych moc wybuchu, są mniej trwałe, lecz zaprojektowane są tak, aby emitować jak najmniej szkodliwych gazów (np. tlenek węgla, tlenki azotu i inne). W związku z tym cechuje je zerowy, a nawet lekko dodatni bilans tlenowy. To powoduje, że elementy przedmiotów z obszaru strefy kruszności i bliskiego oddziaływania wybuchem nie będą miały śladów sadzy jak po wybuchu wojskowych materiałów wybuchowych, lecz mogą zawierać jasne naloty związane z niepalnymi produktami wybuchu.

Największy problem stwarzają **samodziałowe kruszące materiały wybuchowe**, ponieważ ich podobieństwo powybuchowe (w postaci charakterystycznych śladów pozostawionych na rozbitych elementach) do wojskowych czy górniczych materiałów wybuchowych zależy od wiedzy wytwórcy i rodzaju użytych materiałów wybuchowych. Rozpoznać je właściwie można tylko i wyłącznie po wykonaniu szczegółowych badań laboratoryjnych.

Materiały wybuchowe miotające i pirotechniczne, które przeważnie ulegają mechanizmowi wybuchowemu zgodnemu z deflagracją, pozostawiają jeszcze inne ślady na przedmiotach znajdujących się w zasięgu ich działania. Po-

nieważ proces deflagracji trwa dłużej niż detonacji, to należy spodziewać się właściwie dwóch stref: tzw. **strefy bezpośredniego oddziaływania płomienia** przyjmującego postać obłoku wypełnionego gorącymi produktami spalania i strefy działającej na dalszą odległość, tzw. **strefy oddziaływania strumienia ciepła**. Pierwszej strefie towarzyszy znacznie mniejsze oddziaływanie podmuchowe, związane z rozprzestrzenianiem się produktów gazowych na pograniczu lub niewiele powyżej prędkości dźwięku w powietrzu, co nie wydziela raczej mocnego, krótkiego huku, ale bardziej słyszalny łoskot lub fuknięcie bądź ewentualnie brak bezpośredniego efektu dźwiękowego.

Strefa bezpośredniego oddziaływania płomienia charakteryzować się będzie innymi cechami dla materiału pirotechnicznego i innymi dla materiału miotającego. Różnice pochodzą bezpośrednio od rodzaju i stanu skupienia produktów zawartych w obłoku powybuchowym gorących produktów spalania. Materiały wybuchowe miotające na bazie nitrocelulozy (prochy i paliwa raketowe) w produktach wybuchu będą miały jedynie rozgrzane do wysokiej temperatury gazy, których bezwładność cieplna jest niska. Natomiast materiały pirotechniczne w obłoku powybuchowym zawierają duże ilości zawieszonych, rozżarzonych ciekłych i stałych cząstek o bardzo wysokiej temperaturze, których bezwładność cieplna jest dużo większa i przez to oddziaływanie termiczne będzie dłuższe, a powierzchnie przedmiotów znajdujących się w strefie takiego obłoku będą bardziej narażone na zniszczenia termiczne. Na powierzchniach tych będą się znajdować widoczne stałe produkty podeflagracyjne, które jest łatwo ujawnić, ocenić i odróżnić od uszkodzeń powierzchni będących wynikiem oddziaływania jedynie rozgrzanych gazów lub od strumienia ciepła, gdzie rozkładowi termicznemu uległ tylko materiał powierzchni.

Wybuch przestrzenny

Wybuch przestrzenny, zwany inaczej spalaniem kinetycznym, to deflagracja lub detonacja homogenicznej mieszaniny substancji palnej w stanie gazu, pary lub zawiesiny, np. pyłu ciała stałego lub mgły w powietrzu lub innym gazie utleniającym, takim jak np. tlen, fluor itp.

Warunkiem powstania wybuchu przestrzennego jest otrzymanie mieszaniny w stosunkach ilościowych substancji palnych do substancji utleniających zbliżonych do stechiometrycznego, co określają tzw. granice wybuchowości. Źródło inicjacji takich mieszanin gazowych w postaci np. iskry lub otwartego płomienia powinno mieć odpowiednią energię wystarczającą do pobudzenia układu.

Dolna granica wybuchowości (DGW) to minimalne stężenie substancji palnej w mieszaninie z powietrzem, tlenem lub innym gazem utleniającym (chlor lub fluor), przy którym po zainicjowaniu nastąpi reakcja wybuchowa. Poniżej tej granicy wybuch jest niemożliwy ze względu na zbyt małą ilość składnika palnego.

Górna granica wybuchowości (GGW) to najwyższe stężenie substancji palnej w mieszaninie z powietrzem lub innym gazem utleniającym, przy którym jeszcze może nastąpić zapalenie się tej substancji i jej wybuch pod wpływem bodźca termicznego.

Poniżej przedstawiono tabelę parametrów DGW, GGW i minimalnej energii inicjacji dla mieszanin paliwowo-powietrznych i paliwowo-tlenowych dla kilku powszechnych substancji w stanie gazowym i pary.

Tab. 1. Dolne i górne granice wybuchowości oraz minimalna energia pobudzenia

Paliwo	Mieszanina z powietrzem		E_{min} [mJ]	Mieszanina z tlenem	
	DGW [% obj.]	GGW [% obj.]		DWG [% obj.]	GGW [% obj.]
Wodór	4,1	74,2	0,02	4,0	94,0
Acetylen	2,5	80,0	0,02	2,5	98,0
Metan	5,3	14,0	0,28	5,1	61,0
Propan	2,4	9,5	0,26	2,3	55,0
Butan	1,9	8,4	0,25	1,8	48,0
Benzyna	1,0	7,8	0,24	-	-

Wybuchy przestrzenne zachodzące zarówno w pomieszczeniach wewnętrznych, jak i na otwartej przestrzeni charakteryzują się bardzo dużym działaniem niszczącym na ściany wewnętrzne obiektów i przeszkody. Uszkodzenia te mają z reguły charakter rozdarć, wybrzuszeń lub pęknięć bardziej charakterystycznych dla uszkodzeń w strefie burzącej niż w strefie działania kruszącego lub bliskiego oddziaływania wybuchem. Podczas wybuchu przestrzennego obserwuje się najsilniejsze działanie burzące na powierzchnie lekkich konstrukcji, np. okien, drzwi lub dachów.

Pomieszczenia, w których nastąpiło całkowite wypełnienie mieszaniną paliwowo-powietrzną, podczas wybuchu ulegają całkowitej destrukcji, czemu towarzyszy zniszczenie konstrukcji budynku, wyburzenie ścian oraz stropów i rozrzucenie elementów na znaczne odległości.

Mieszanki paliwowo-powietrzne zawierające składnik palny lżejszy od powietrza (np. metan) podczas wybuchu powodują znacznie większe uszkodzenia obiektu w górnych jego częściach, natomiast mieszanki ze składnikami cięższymi od powietrza (np. butan) będą gromadzić się (pełzać) w dolnej części pomieszczeń i podczas wybuchu będą powodować podcinanie ścian. Cechą charakterystyczną wybuchów mieszanin paliwowo-powietrznych powstałych na skutek ulatniania się gazu lub swobodnego odparowania rozpuszczalnika jest bardzo duży efekt burzący, krótkotrwałe działanie wysokiej temperatury oraz wysokie, dynamicznie działające ciśnienie.

W wyniku działania burzącego przemieszczane są elementy konstrukcyjne pomieszczenia (ściany i stropy), natomiast przedmioty znajdujące się w kubicznej przestrzeni, w której nastąpił wybuch, nie są przemieszczane i mogą nosić ślady krótkotrwałego działania wysokiej temperatury.

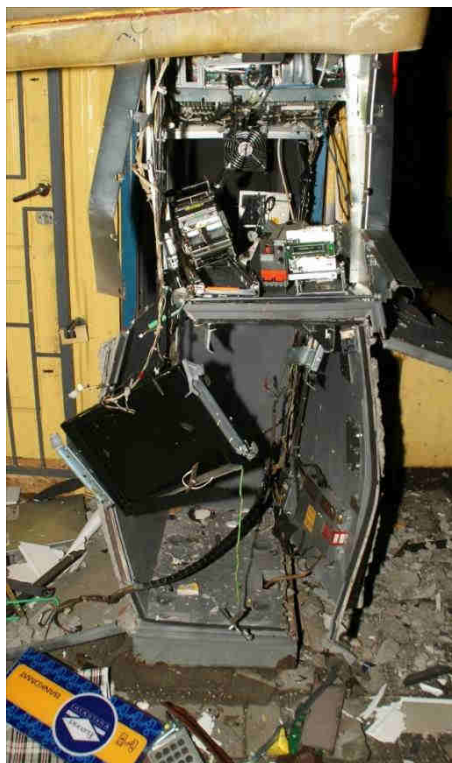
Oprócz wybuchów mieszanin tworzących się w sposób przypadkowy występują wybuchy przestrzenne powodowane w sposób wymuszony, celowo. Należą do nich ostatnio bardzo częste próby kradzieży pieniędzy z sejfów bankomatowych za pomocą wprowadzanych do ich wnętrza mieszanin gazowych, np. acetylenowo-tlenowych.

W odróżnieniu od mieszanin gazów palnych i par cieczy palnych wybuchy pyłów palnych z powietrzem przebiegają kaskadowo. Pył tworzy na skutek podmuchu powietrza obłok o stężeniu w granicach wybuchowości, który po zainicjowaniu powoduje wybuch pierwotny, a następnie wskutek oddziaływania takiego wybuchu na dalej zalegające pyły następują wybuchy wtórne. Taki proces wybuchu powoduje przemieszczenie wybuchu do pomieszczeń zapyłonych poza miejscem zainicjowania. Skutki burzącego działania są w takich przypadkach analogiczne do wybuchów mieszanin gazowych, lecz bardziej rozległe. Wybuchy pyłów możliwe są tylko w przestrzeniach zamkniętych, natomiast wybuchy mieszanin gazowych – także na otwartej przestrzeni, co wykorzystywane jest w technice wojskowej¹².

Poniżej przedstawiono skutki wybuchu przestrzennego mieszaniny paliwowo-powietrznej zastosowanej do otwarcia sejfu bankomatu w celu kradzieży znajdujących się tam pieniędzy. Sposób otwierania sejfu bankomatowego jest bardzo popularny ze względu na fakt niewielkiego oddziaływania wybuchu na banknoty znajdujące się wewnątrz.

¹² T. Baran, A. Policha, *Wybuch i jego skutki – kryminalistyczne badania materiałów i urządzeń wybuchowych*, Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Komendy Głównej Policji, Warszawa 2004.

Ryc. 17. Rozsadzony wybuchem przestrzennym bankomat z usuniętymi kasetami banknotowymi



Inne sposoby otwarcia sejfów za pomocą kruszących materiałów wybuchowych nie dają na ogół oczekiwanego przez sprawcę efektu, gdyż po użyciu niewielkich ilości materiału wybuchowego dochodzi do otwarcia drzwiczek sejfów, lecz często następuje zablokowanie kaset z banknotami, natomiast w przypadku zastosowania zbyt wielkiego ładunku materiału wybuchowego banknoty ulegają zniszczeniu.

Podczas sporządzania opinii kryminalistycznej w tym zakresie najczęściej wnioskuje się, że uszkodzenie bankomatu, a co za tym idzie – otwarcie drzwi sejfów, zostało wywołane gwałtownym dynamicznym wzrostem ciśnienia wewnątrz sejfów. Ciśnienie to zostało spowodowane wybuchem przestrzennym, który mógł nastąpić na skutek wprowadzenia do wewnątrz sejfów gazu w postaci mieszaniny np. paliwowo-powietrznej przez otwór techniczny do transportu banknotów i zainicjowania go w sposób elektryczny za pomocą zapłonika.

Ryc. 18. Bankomat przygotowany do otwarcia wybuchowego (butla acetylenowa z wężkiem i przewodami elektrycznymi wprowadzonymi do sejfów przez podajnik banknotów)



Wybuch przestrzenny powoduje wyłączenie komory sejfów i otwarcie jego drzwi, a w konsekwencji umożliwia swobodny dostęp do kaset z banknotami. Siła wybuchu przestrzennego w komorze sejfów działa głównie na ściany tego obiektu, co spowoduje, że jego zawartość wewnątrz (tzn. kasety z banknotami) praktycznie nie ulega uszkodzeniu.

Inną metodą może być wprowadzenie do wnętrza sejfów mieszaniny tlenu z substancją łatwopalną w stanie gazu lub pary w stosunku zbliżonym do stechiometrycznego, co daje mocniejszy efekt niszczący.

Streszczenie

Opracowanie jest syntezą wiedzy w zakresie techniki kryminalistycznej dotyczącej materiałów wybuchowych. Powstało ono na podstawie wieloletniego doświadczenia autora w pracy z materiałami wybuchowymi i wychodzi naprzeciw oczekiwaniom wszystkich instytucji zajmujących się śledztwem dotyczącym nielegalnego wytwarzania i używania materiałów wybuchowych. Rozpoczyna się krótkim rysem historycznym pokazującym rolę

i rozwój materiałów wybuchowych od momentu ich odkrycia do dnia dzisiejszego. Następnie przedstawiono funkcje materiałów wybuchowych jako popularnego środka do popełniania przestępstw. Dalej omówiono właściwości i rodzaje materiałów wybuchowych oraz zilustrowano pojęcie urządzenia wybuchowego. Zwrócono szczególną uwagę na te elementy zjawiska wybuchu, które powinny być wykorzystywane w badaniach kryminalistycznych, i dokładnie je opisano.

Słowa kluczowe: materiały wybuchowe, urządzenia wybuchowe, badania kryminalistyczne, opinia kryminalistyczna, wybuch, oględziny miejsca zdarzenia, atak bombowy, analiza chemiczna

Summary

The research paper presents a synthesis of knowledge forensic techniques related to explosives. The paper is based on the Author's rich experience in working with explosives for many years and responds to the expectations of all entities who carry out investigations in cases involving illegal manufacturing and use of explosives.

It starts with a brief historical overview which shows the role and the development of explosives from the times of their first synthesis until now. Subsequently, the specific role of explosives in committing criminal offenses has been described. This is followed by the presentation of properties and types of explosives and the definition of an explosive device. Particular attention has been paid to these elements of an explosion, which should be assessed during forensic examination.

Keywords: explosives, explosive devices, forensic examination, forensic report, explosion, crime scene investigation, bomb attacks, chemical analysis

Bibliografia

- Baran T., Policha A., *Wybuch i jego skutki – kryminalistyczne badania materiałów i urządzeń wybuchowych*, Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Komendy Głównej Policji, Warszawa 2004.
- Brzezinka P., *Analiza możliwości pozyskiwania materiałów wybuchowych z wyrobów wojskowych pochodzenia wojennego do konstrukcji samodziiałowych urządzeń wybuchowych*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2005.
- Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski J., Trębiński R., Trzciński W.A., *Wojskowe materiały wybuchowe*, WMiIM Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2000.
- Głos S., *Budowa i zasada działania elementów zabezpieczających w samodziiałowych urządzeniach wybuchowych*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2005.
- Pawłowski W., *Wybrane zagadnienia związane z badaniem miejsc zamachów bombowych*, w: R. Bachliński, A. Policha (red.), *Fizykochemiczne badania śladów kryminalistycznych*, Centralne Laboratorium Kryminalistyczne Policji, Warszawa 2013.
- Pawłowski W., Radomski A., *Inicjujące materiały wybuchowe jako istotne składniki samodziiałowych urządzeń wybuchowych*, „Problemy Kryminalistyki” 2006, nr 251.

- Steckiewicz A., *Aspekty niesprawności samodziiałowych urządzeń wybuchowych na bazie przykładów praktycznych*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2004.
- Szydłowski A., *Podstawy pirotechniki*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa 1957.
- Terela R., *Analiza urządzeń wybuchowych stosowanych w zamachach bombowych na osoby chronione*, praca dyplomowa pod kierunkiem W. Pawłowskiego, studia podyplomowe, Politechnika Śląska Wydział Chemiczny, Gliwice 2005.
- Urbański T., *Chemia i technologia materiałów wybuchowych*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa 1954.
- Zygmunt B. (red.), Maranda A., Buczkowski D., *Materiały wybuchowe trzeciej generacji*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2007.