

Kierunki rozwoju miotających materiałów wybuchowych w aspekcie wymagań przyszłościowej broni palnej

Trends in development of propellants in aspects of requirements of future gun propellant system

Zbigniew K. Leciejewski¹, Stanisław Cudziło²

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska

1) Wydział Mechatroniki i Lotnictwa

2) Wydział Nowych Technologii i Chemii

Streszczenie. Postęp w rozwoju stałych miotających materiałów wybuchowych oraz wiedzy warunkującej możliwość coraz bardziej szczegółowej analizy zjawisk zachodzących podczas procesu miotania pocisku to główne czynniki rozwoju prochowych, lufowych układów miotających. Rozwój przyszłościowej amunicji oraz prochowych układów miotających jest ukierunkowany na poprawę charakterystyk energetyczno-balistyczno-użytkowych obecnie stosowanych prochów oraz na poszukiwanie nowych miotających materiałów wybuchowych o składzie chemicznym bardziej przyjaznym dla środowiska (tzw. green propellants).

W prezentowanym artykule zostanie zaprezentowana analiza możliwości rozwojowych układów miotających w XXI w. z punktu widzenia balistyki wewnętrznej. W chwili obecnej najbardziej perspektywicznymi, z taktycznego i technicznego punktu widzenia, wydają się być układy miotające z prochem warstwowym (dla klasycznego rozwiązania układu miotającego) oraz układy typu ETC (Electrothermo-Chemical gun).

Abstract. Evaluation of knowledge leading to more precise internal ballistics analysis and development of solid propellants are the main development factors of gun propellant systems. This paper considers some future gun propellant systems with new solid propellants. The new, future propellants should make possible increase of projectile muzzle velocity in classical gun weapon, decrease of barrel's wear, using of low vulnerability ammunition, should assure to conditions for thermal stability improvement of ballistic parameters of ammunition and should create new possibilities in barrel weapon construction. There are many original gun propellant systems that have been developed from 70' of previous century but from today's tactical and technological point of view it seems that classical gun systems with new layered propellants and electro-thermal gun systems are the most future systems.

Słowa kluczowe: nowe materiały miotające, przyszłościowe prochowe układy miotające

Keywords: new propellants, future gun propellant systems

1. Wprowadzenie

Rozwój uzbrojenia, sprzętu wojskowego i środków bojowych wynika z potrzeb sił zbrojnych danego kraju oraz konieczności przeciwstawienia się pojawiającym się zagrożeniom. Koncentrując się w niniejszym artykule na rozwoju prochowych układów miotających należy przypomnieć, że aż do końca I połowy XIX w. proch czarny był jedynym znanym materiałem wybuchowym, a czarnoprochowa broń lufowa - dominującym sprzętem miotającym, wykorzystywanym przez wszystkie armie w tym okresie.

Odkrycie w I połowie XIX w. nitrocelulozy i nitrogliceryny spowodowało opracowanie w latach 1884 ÷ 1888 nowej klasy prochów o ponad 3-krotnie lepszych właściwościach energetycznych w porównaniu z prochem czarnym, a geometryczne kształty ziaren prochowych oraz wiedza o naturze ich spalania stworzyły możliwość świadomej regulacji intensywności dopływu gazów prochowych do przestrzeni zapociskowej lufy.

Ponadto odkrycie na początku XIX w. nowych materiałów wybuchowych wrażliwych na bodźce mechaniczne (materiały wybuchowe inicjujące), a w ślad za tym skonstruowanie naboju scalonego stworzyło podwaliny pod

konstrukcję strzeleckiej i artyleryjskiej automatycznej broni miotającej.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana analiza możliwości rozwojowych układów miotających w XXI w. z punktu widzenia balistyki wewnętrznej. Zostaną przedstawione przyszłościowe rozwiązania ideowe układów miotających z zaakcentowaniem tendencji rozwojowych w zakresie nowych miotających materiałów wybuchowych.

2. Tendencje rozwojowe w zakresie nowych miotających materiałów wybuchowych

Podstawowymi składnikami prochów bezdymnych pozostają niezmiennie od kilkadziesiąt lat nitroceluloza (NC), nitrogliceryna (NG) lub dinitrodiglikol (DNDG) oraz nitroguanidyna (NGu). Nie oznacza to jednak, że materiały miotające nie ulegały w tym czasie żadnym zmianom. Na przykład zastępując częściowo lub całkowicie nitroglicerynę innymi plastyfikatorami obniżono temperaturę spalania i zmniejszono podatność prochów na przypadkowe zainicjowanie ich spalania lub wybuchu. Początkowo zamiennikiem nitrogliceryny były inne mniej zasobne w energię i mniej wrażliwe azotany polialkoholi, np. triazotan trimetylolektanu (TMETN), diazotan trietylenoglikolu (TEGDN) lub triazotan butantriolu (BTTN). Szerokie zastosowanie w roli plastyfikatorów znalazły także bis(2,2-dinitropropylo)acetal (BDNPA) i bis(2,2-dinitropropylo)formal (BDNPF). Zwykle stosuje się równowagową mieszaninę BDNPA-BDNPF, ponieważ ten skład ma najniższą temperaturę topnienia [1]. Podobne zastosowania mają plastyfikatory z rodziny nitroksyetylonitroamin (NENAs) o wzorze ogólnym $RN(NO_2)CH_2CH_2ONO_2$, gdzie R oznacza podstawnik metylowy, etylowy, propylowy lub butylowy. NENAs zawierają w swej strukturze zarówno ugrupowanie $-ONO_2$ (występuje w NC) jaki i $-NNO_2$ (występuje w heksogenie (RDX) i oktogenie (HMX)). Dzięki temu świetnie plastyfikują kompozycje zawierające te substancje, nawet wtedy, gdy masowy udział RDX lub HMX przekracza 70%. Wciąż są stosowane, często w mieszaninach ze strukturalnie pokrewnym DANPE (1,5-diazydo-3-nitroazapentan), w prochach i paliwach raketowych typu LOVA. Przykładowy skład takiego prochu jest następujący: 76% RDX lub HMX, 19,6% BuNENA/DANPE, 4% nitroceluloza i 0,4% centralit I.

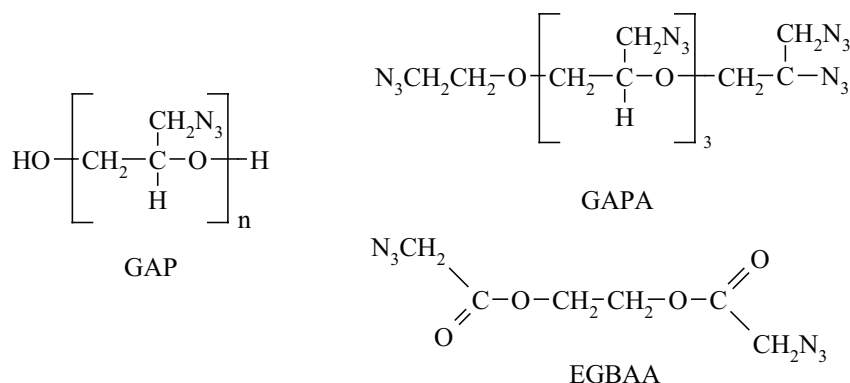
Materiały miotające zawierające NENAs/DANPE i RDX/HMX charakteryzują się doskonałymi właściwościami energetycznymi (wysoka wartość siły prochu, mała średnia masa cząsteczkowa produktów spalania, stosunkowo niska temperatura spalania) i są jednocześnie odporne na incydentalne oddziaływania mechaniczne i termiczne. Istotną wadą NENAs (szczególnie tych o najniższej masie cząsteczkowej) jest ich nadmierna lotność.

Rozwój przyszłościowej amunicji o wysokich parametrach balistycznych oraz prochowych układów miotających jest ukierunkowany na poprawę charakterystyk energetyczno-balistyczno-użytkowych obecnie stosowanych prochów oraz na poszukiwanie nowych miotających materiałów wybuchowych o składzie chemicznym bardziej przyjaznym dla środowiska (tzw. *green propellants*), które powinny umożliwić:

- wzrost prędkości wylotowej pocisków, szczególnie w klasycznym rozwiązaniu konstrukcyjnym układu miotającego;
- zmniejszenie zużycia wewnętrznej powierzchni lufy, co przyczynia się do zwiększenia jej żywotności, a także polepszenia celności broni;
- zmniejszenie wrażliwości amunicji na działanie czynników mechanicznych i termicznych (podczas transportu, przechowywania i eksploatacji);
- zwiększenie stabilności charakterystyk balistycznych amunicji w wyniku zmian temperaturowych środowiska w szerokim zakresie.

Powyższe oczekiwania mogą być spełnione poprzez zastosowanie prochów zawierających energetyczne polimery oraz nowe wysokoazotowe związki wybuchowe. Indywidualny rozkład takich polimerów jest procesem egzotermicznym wskutek obecności w ich strukturze grup azydowych ($-N_3$), nitrowych ($-NO_2$) lub azotanowych ($-ONO_2$). Na szczególną uwagę zasługuje grupa azydowa, ponieważ jej rozkład jest związany z wydzielaniem dużych ilości energii (ok. 355 kJ mol^{-1}), a produktem rozkładu jest wyłącznie cząsteczkowy azot. Naturalną konsekwencją tych spostrzeżeń był pomysł wykorzystania polimerów z grupami azydowymi, które mogą zawierać znacznie więcej azotu. Pierwszym polimerem tego typu był poli(azydek glicydyli) (GAP). GAP to polieter (politlenek etylenu) sfunkcjonalizowany grupami azydometylowymi $-CH_2N_3$ (rys. 1).

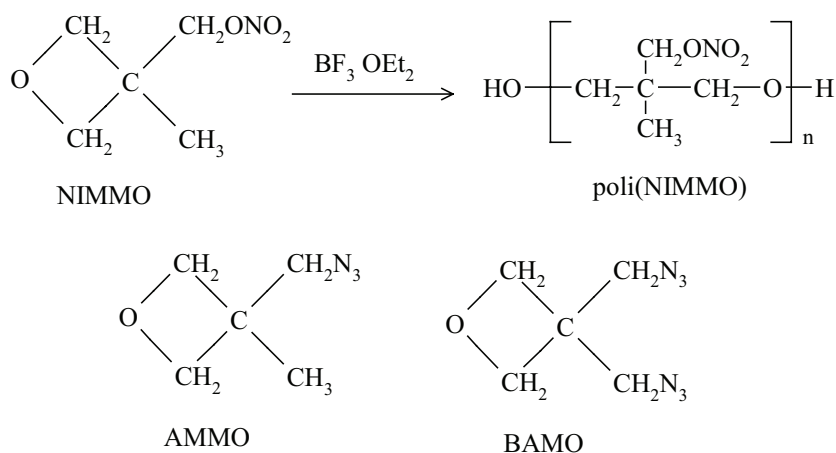
Polimery GAP charakteryzują się niską temperaturą zeszklenia (polimer liniowy $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ i polimer rozgałęziony $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$), jednak po usieciowaniu i w ujemnych temperaturach są nadmiernie twarde i kruche.



Rys. 1. Struktura poli(azydku glicydylu) i kompatybilnych z nim plastyfikatorów

Wada ta może być wyeliminowana przez wprowadzenie plastyfikatorów do składu mieszaniny. Najlepsze efekty uzyskano stosując oligomery (np. trimery) azydku glicydylu. Aby uniemożliwić ich reakcje z izocjanianami, grupy hydroksylowe tych związków są podstawiane grupami azydowymi (GAPA) (rys. 1). W roli plastyfikatorów GAP można też stosować azotany polialkoholi (np. BTTN, TMETN) lub otrzymane niedawno estry poliakoholi i kwasu azydooctowego (EGBAA).

Energetyczne polioksetany zostały zsyntetyzowane przez Mansera [1] z 3-nitroksymetylo-3-metylooksetanu (NIMMO), 3,3-bis-(azydometylo)oksetanu (BAMO) i 3-azydometylo-3-metylooksetenu (AMMO) (rys. 2).



Rys. 2. Struktury oksetanów wykorzystywanych do syntezy energetycznych polimerów

BAMO ma symetryczną strukturę i jest ciałem stałym o temperaturze topnienia ok. $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tworzy polimery o znacznym stopniu krystaliczności. Jego kopolimery z niesymetrycznym AMMO mają właściwości termoplastyczne (ang., *ThermoPlastic Elastomers, TPE*).

Polimery niesymetrycznych oksetanów, np. poli(NIMMO), mają niskie temperatury zeszklenia, mieszają się bez ograniczeń z podobnymi strukturalnie plastyfikatorami (zwykle odpowiednimi oligomerami oksetanów lub NENAs) i mogą być sieciowane izocjanianami w podwyższonej temperaturze (podobnie jak GAP). Poli(NIMMO) jest klasyfikowany jako substancja niewybuchowa, chociaż ma stosunkowo wysoką dodatnią entalpię tworzenia, ok. 820 kJ kg^{-1} [1].

Przeprowadzone dotychczas badania jednoznacznie potwierdziły przewagę prochów typu LOVA zawierających TPE nad wcześniej opracowanymi kompozycjami, np. RDX(76%)/NC-BuNENA-DANPE(24%). Proste zastąpienie lepszczą NC/BuNENA/DANPE kopolimerem BAMO-AMMO prowadzi do zwiększenia siły prochu o ok. 3% i obniżenie temperatury spalania o ponad $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (do ok. 2830 K). Jeżeli dodatkowo w miejsce RDX zastosuje się zasobniejszy w energię CL-20 (HNIW, heksanitroheksaazowurcytan) siła prochu wzrasta

od 1180 J g^{-1} do 1290 J g^{-1} . Adiabatyczna temperatura spalania takiego prochu wynosi wówczas ok. 3380 K [2]. W dłuższej perspektywie czasowej należy się spodziewać szerszego wykorzystania związków wysokoazotowych. Niektóre z nich w ogóle nie zawierają w swej strukturze grup nitrowych, a pomimo tego są zdolne do samopodtrzymujących się przemian wybuchowych. Jest to wynik wysokich dodatnich entalpii tworzenia takich związków. Wśród ich zalet wymienia się niską średnią masę cząsteczkową produktów rozkładu oraz małą wrażliwość na bodźce mechaniczne, w tym na falę uderzeniową.

W tabeli 1 porównano struktury i właściwości obecnych i przyszłych wysokoenergetycznych składników materiałów miotających. Zestawienie to dobrze ilustruje dominującą obecnie koncepcję rozwoju materiałów energetycznych, tzn. gromadzenie energii raczej w strukturze związków bogatych w azot (rosnąca entalpia tworzenia), a nie pozyskiwanie jej z reakcji utleniania węgla i wodoru (malejący bilans tlenowy).

Ładunki BTATz i DHTz spalają się bez widocznego płomienia, ulegając przy tym całkowitej gazyfikacji. Liniowa prędkość spalania u jest wyjątkowo wysoka, ale jednocześnie słabo zależy od ciśnienia [3].

Zalety użytkowe energetycznych TPE z grupy polioksetanów oraz unikalne charakterystyki procesu spalania związków zbudowanych w przeważającej części z azotu pozwalają przypuszczać, że ich znaczenie jako składników przyszłych wysokoenergetycznych i mało-wrażliwych materiałów miotających i wybuchowych będzie systematycznie wzrastać.

Tab. 1. Struktury i właściwości obecnych i przyszłych składników materiałów miotających

Skrót nazwy	Związek Wzór chemiczny	Entalpia tworzenia [kJ mol ⁻¹]	Bilans tlenowy [%]	Zawartość azotu [%]
AP	NH_4ClO_4	-298	+35	11
ADN	$\text{NH}_4\text{N}(\text{NO}_2)_2$	-151	+26	45
HNF	$\text{N}_2\text{H}_5\text{C}(\text{NO}_2)_3$	-71	+13	38
RDX		+67	-22	38
HMX		+75	-22	38
CL-20		+420	-11	38
DHTz		+536	-79	79
BTATz		+883	-65	79
DAAT		+1035	-73	76
TAGAT		+1067	-73	82

3. Tendencje rozwojowe w zakresie nowych układów miotających

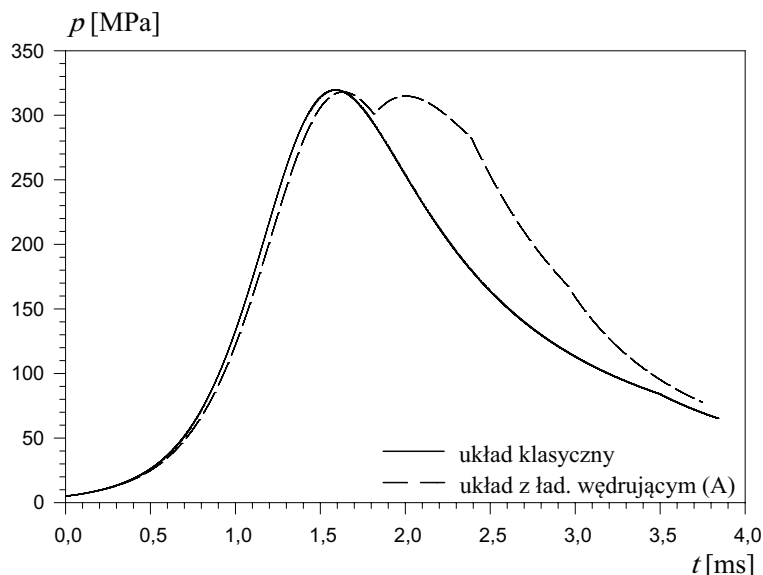
Badania nad poprawą charakterystyk energetyczno-balistycznych prochów konwencjonalnych, poszukiwania nowych materiałów miotających oraz innych źródeł energii pozwalają na dalszy rozwój układów miotających wychodząc naprzeciw oczekiwaniom współczesnego pola walki. Np. spełnienie potrzeb amerykańskiego programu Army's Future Combat System [4] wymaga zmniejszenia kalibru aktualnie stosowanych luf czołgowych (120 mm) przy równoczesnym oczekiwaniem wzroście o 25% energii wystrzelianych pocisków. Zakłada się przy tym, że zastosowane nowe miotające materiały wybuchowe nie przyczynią się do wzrostu zużycia wewnętrznego przewodu lufy.

W prochowym układzie miotającym czynnikiem determinującym prędkość i energię wylotową pocisku w konkretnym układzie miotającym jest praca gazów prochowych, zależna od charakteru zmian ciśnienia $p(t)$ tych gazów w lufie podczas strzału. W przypadku prochowych układów miotających wykorzystujących konwencjonalne prochy nitrocelulozowe i nitroglicerynowe szczytem możliwości taktyczno-eksploatacyjnych były monstrualne, wymagające wieloosobowej obsługi działa z lat II wojny światowej. Cechą charakterystyczną tych konstrukcji było ogromne zużycie masy ładunku prochowego podczas każdego strzału i cecha ta w dalszym ciągu jest aktualna podczas konstruowania klasycznych układów miotających wykorzystujących konwencjonalne prochy nitrocelulozowe i nitroglicerynowe.

Analizowanym w latach 70 i 80. tych XX w. rozwiązaniem konstrukcyjnym pozwalającym na wzrost prędkości wylotowej pocisków był układ miotający z dodatkowym ładunkiem prochowym, tzw. ładunkiem wędrującym (ang. *Travelling Charge System*, TCS) [5,6]. Głównym elementem odróżniającym układ miotający z ładunkiem wędrującym od klasycznego układu miotającego był dodatkowy prochowy ładunek wędrujący (mechanicznie związany z pociskiem), którego zadaniem było ukształtowanie – w wyniku jego spalania – innego jakościowo-ilościowego rozkładu ciśnienia gazów w lufie, powodującego wzrost prędkości wylotowej pocisku.

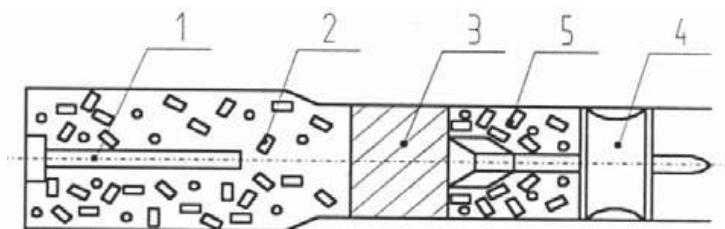
Prace nad prochami o przeznaczeniu na ładunki wędrujące koncentrowały się w tym czasie wokół materiałów o roboczej nazwie VHBR (ang. *Very High Burning Rates propellants*) - prochy o bardzo dużej szybkości spalania, w których głównym składnikiem utleniającym był kruszący materiał wybuchowy (np. oktogen), paliwem - boran kwasu dekahydrodekaborowego, natomiast nitroceluloza z glikolem polietylenowym stanowiła główny składnik lepiszcza.

Przykładowy, porównawczy obraz zmian (w czasie) ciśnienia gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej lufy dla klasycznego układu miotającego (linia ciągła) oraz dla układu miotającego z ładunkiem wędrującym (linia przerywana) zaprezentowano na rys. 3. Taki obraz zmian ciśnienia w lufie pozwala na zwiększenie prędkości wylotowej pocisku jako konsekwencja zwiększenia impulsu ciśnienia gazów prochowych (większa powierzchnia pod krzywą ciśnienia $p(t)$).



Rys. 3. Wykresy $p(t)$ gazów prochowych w lufie układu TCS [6]

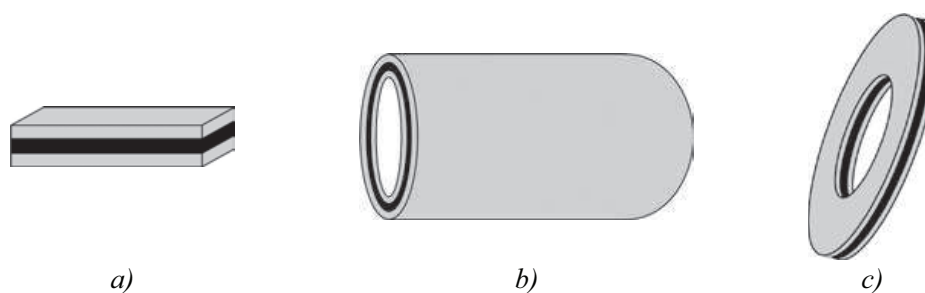
Podobne efekty można uzyskać w układzie miotającym z wędrującą komorą prochową (ang. *Serial Chamber Gun System, SCS*) [5]. W układzie tym (rys. 4), podobnie jak w układzie z ładunkiem wędrującym, spalanie dodatkowego ładunku prochowego (również typu VHBR) zostaje zainicjowane wtedy, gdy pocisk wraz z poruszającą się z nim wędrującą komorą prochową (przestrzeń pomiędzy tłokiem 3 i pociskiem 4) znajdzie się w określonym miejscu w lufie.



Rys. 4. Układ miotający z wędrującą komorą prochową (schemat ideowy): 1) element zapłonowy; 2) zasadniczy ładunek miotający; 3) ruchomy tłok; 4) pocisk; 5) dodatkowy prochowy ładunek miotający

Energia gazu powstającego ze spalającego się dodatkowego ładunku prochowego przyspiesza pocisk już poruszający się w lufie z określoną prędkością. Obie przedstawione wyżej idee układów miotających nie wyszły jednak poza modele badawcze i analizy teoretyczne głównie ze względu na konieczność dokładnej synchronizacji procesu zapłonu ładunku wędrującego.

Wspomniany w punkcie 2 nowy materiał wybuchowy CL-20 oraz inne materiały wybuchowe nowej generacji (jak np. DHTz, BTATz, DAAT, TAGAT) z dodatkiem termoplastycznego lepiszcza mogą w przyszłości tworzyć nową generację materiałów miotających tzw. prochów warstwowych (rys. 5).



Rys. 5. Przykłady struktury prochów warstwowych: a) układ warstw w prochu warstwowym: warstwa zewnętrzna (szara) – o małej szybkości spalania; warstwa wewnętrzna (czarna) – o dużej szybkości spalania; b) rurka warstwowa; c) krążek warstwowy

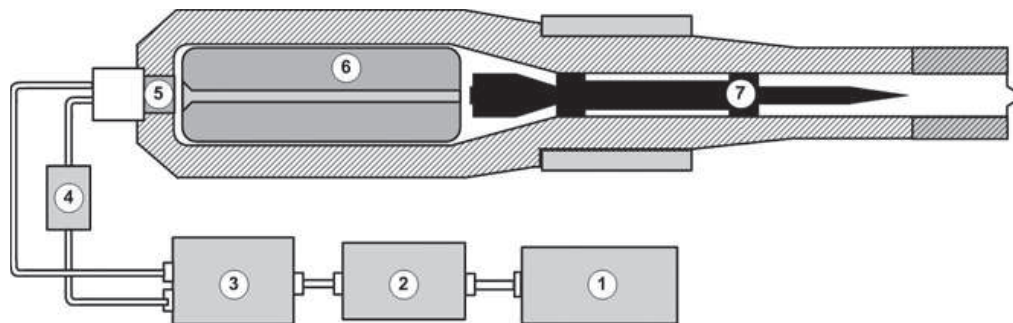
Prochy warstwowe, niezależnie od kształtu ziarna prochowego, wyróżniają się istnieniem warstw (wewnętrznej i zewnętrznej) składających się z prochów o różnej szybkości spalania (rys. 5). Warstwa zewnętrzna (*slow burning rate outer layer*) charakteryzuje się znacznie mniejszą szybkością spalania w stosunku do warstwy wewnętrznej (ang. *fast burning rate inner layer*).

Zastosowanie prochów warstwowych pozwala na otrzymanie innego jakościowo (w stosunku do rozwiązania z zastosowaniem prochów konwencjonalnych) rozkładu ciśnienia gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej. Rozkład ten jest jakościowo tożsamy z obrazem zmian ciśnienia w układzie TCS (rys. 3) i pozwala na wzrost prędkości wylotowej pocisków w klasycznym układzie miotającym. W odróżnieniu jednak od układu TSC, zastosowanie prochu warstwowego nie pociąga za sobą żadnych zmian zarówno w konstrukcji samej amunicji, jak i układu miotającego.

Wzrost prędkości wylotowej pocisków w wyniku powiększenia wartości impulsu ciśnienia gazów prochowych w lufie nie jest tylko efektem polepszenia charakterystyk energetyczno-balistycznych materiałów miotających. Wynika również z modyfikacji sposobu ich zapłonu. Odzwierciedleniem tego procesu są układy miotające typu ETC (ang. *Electrothermal-Chemical gun system*).

W układzie tym (rys. 6) zapłon ładunku miotającego jest inicjowany za pośrednictwem generatora plazmy,

a materiał miotający jest katalizowany zarówno przez plazmę jak i typowe procesy wymiany ciepła (przewodzenie, przejmowanie, promieniowanie).



Rys. 6. Koncepcja ideowa układu miotającego typu ETC: 1) akumulator podstawowy; 2) akumulator dodatkowy; 3) układ formujący impuls; 4) przełącznik zapłonu; 5) nabój z zapłonem plazmowym; 6) materiał miotający; 7) penetrator i sabot

Układy ETC narodziły się z koncepcji elektrotermicznego układu miotającego (ang. *ElectroThermal gun, ET*) rozwijanego w latach 80. XX wieku przez USA, Niemcy i Francję. Wprowadzone układy te pozwalały osiągać duże energie wylotowe pocisków, ale wymagały dostarczenia znacznie większych ilości energii. Przykładowo wystrzelenie z lufy kalibru 105 mm pocisku o masie 2 kg z prędkością wylotową ok. 2400 m s^{-1} (energia o wartości 5,4 MJ) wymagało dostarczenia ok. 30 MJ energii elektrycznej [7].

Układy ETC nie wymagają dostarczenia tak dużych ilości energii elektrycznej. Wystrzelenie z lufy kalibru 120 mm pocisku o masie 8,4 kg z prędkością wylotową ponad 1800 m s^{-1} (energia o wartości 14,1 MJ) wymaga dostarczenia około 100 kJ energii elektrycznej. W przypadku zastosowania amunicji z prochem o obniżonej wrażliwości (LOVA) zastosowanie zapłonu plazmowego pozwala nie tylko skuteczniej zainicjować proces zapłonu tego materiału miotającego [8], ale również przyczynia się do uzyskiwania większych prędkości wylotowych pocisków, o ok. $(50 \div 100) \text{ m s}^{-1}$, w stosunku do zapłonu tego prochu z wykorzystaniem prochu czarnego jak materiału zapłonowego.

Problemy z magazynowaniem energii elektrycznej niezbędnej do zasilania generatora plazmy ukierunkowane są na polepszenie wydajności kondensatorów (przy minimalizacji ich objętości i masy) lub zastąpienie generatorów plazmy zasilanych elektrycznie, generatorami plazmy zasilanymi energią wybuchu. Wytworzenie wysokotemperaturowej plazmy w tym generatorze jest efektem jonizacji płynnego helu przez falę wybuchową eksplodującego materiału wybuchowego o małej masie. Przeprowadzone analizy dowodzą, że układy miotające typu ETC mogą już w niedalekiej przyszłości stworzyć nową generację uzbrojenia czołgowego i artylerii polowej.

4. Wnioski

W chwili obecnej najbardziej perspektywicznymi, z taktycznego i technicznego punktu widzenia, wydają się być układy miotające z prochem warstwowym (dla klasycznego rozwiązania układu miotającego) oraz układy typu ETC (ang. *Electrothermo-Chemical gun*).

Równolegle z rozwojem stałych materiałów miotających oraz prochowych układów miotających trwają prace na układami miotającymi, w których stały ładunek prochowy jest wykorzystywany jedynie do wstępnego nadania pociskowi prędkości w lufie, a dalsze jego przyspieszenie jest efektem oddziaływania energii innego typu. Tymi układami są układy gazowo-prochowe (RAM Akcelerator) i układy elektromagnetyczne EMC (ang. *ElectroMagnetic-Chemical Gun*) [9÷11].

Chociaż istnieje wyraźny postęp w rozwoju zarówno miotających materiałów wybuchowych jak i prochowych układów miotających to daleko jednak prędkościom pocisków materialnych wystrzelanych z tych układów do maksymalnej prędkości jaką jest prędkość światła.

Takie możliwości daje broń emitująca, czyli systemy broni skierowanej energii obejmujące m.in. technologie

laserowe [12]. Czy to oznacza, że nastąpi kres prochowych układów miotających? Zapewne nie. Dopóki będzie systematyczny postęp w rozwoju chemicznych źródeł energii będzie możliwy również postęp w prochowych układach miotających, a ich kompilacja z bronią emitującą może w przyszłości przynieść bardzo ciekawe rozwiązania konstrukcyjne.

Literatura

- [1] Provas A., *Energetic polymers and plasticisers for explosive formulations – A review of recent advances*. DSTO-TR-0966, DSTO, Salisbury, SA, UK, 2000.
- [2] Badgular D. M., Talawar M. B., Asthana S. N., Mahulikar P. P., *Advances in science and technology of modern energetic materials: An overview*. Journal of Hazardous Materials, 151, 289-305, 2008.
- [3] Hiskey, M. A., Chavez D. E., Naud D. L., *Insensitive high-nitrogen compounds*. LA-UR-01-1493, LANL, NM, USA, 2002.
- [4] Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies, National Research Council, *Advanced Energetic Materials*. pp. 28-34, Published by The National Academic Press, Washington, USA, 2004
- [5] Leciejewski Z., *Contemporary Possibilities of Projectile Velocity Rising in a Gun Propellant System*. Proceedings of the 12th International Scientific Conference on Armament and Technics of Land Forces 2006 – ISBN 978-80-8040-309-6, pp. 206÷211; 29 November 2006, Published by Academy of Land Forces, Liptovsky Mikulas, Slovakia, 2006.
- [6] Leciejewski Z., Surma Z., *Analiza balistyczna układu miotającego z ładunkiem wędrującym*. Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, Vol. LIII nr 2÷3, str. 57÷68, Warszawa, 2004.
- [7] Dyvik J., Herbig J., Appleton R., O'Reilly J., Shin J., *Recent Activities in Electro-Thermal Chemical Launcher Technologies at BAE Systems*. Proceedings of 13th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, May 22-25.2006, Potsdam, Germany, 2006.
- [8] Taylor M. J., *Ignition of Propellant by Metallic Vapour Deposition for an ETC Gun System*. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 26, pp. 137-143, 2001.
- [9] Janson B., Backofen J. Jr., Brown R.E., Cayzac R., Diederer A., Giraud M., Held M., Horst A.W., Thoma K., *The Future of Warhead, Armour and Ballistics*. Proceedings of the 23rd International Symposium on Ballistics, pp. 3÷27, 16÷20 April 2007, Tarragona, Spain, 2007.
- [10] Wang Z.Y., Wang X.M., Xu F.M., Zhang X.Y., Li B.M., Yang G.L., Zhang X.B., *Some Progress on Ballistics in China*. Proceedings of the 25th International Symposium on Ballistics, pp.25-44, 17-21 May 2010, Beijing, China, 2010.
- [11] Knowlen C., Joseph B., Bruckner A.P., *Ram Accelerator as an Impulse Space Launcher: Assessment of Technical Risks*. Proceedings of International Space Development Conference, May 25-28, 2007, Dallas, USA, 2007.
- [12] Mierczyk Z., Wojtanowski J., *Nowoczesne technologie systemów uzbrojenia . Broń laserowa* (redakcja naukowa - Mierczyk Z.) Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, str. 446-460, Warszawa, 2008.