



HIPERDŹWIĘKOWE UKŁADY MIOTAJĄCE – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH

HYPERSONIC PROPULSION SYSTEMS – A REVIEW OF DESIGN SOLUTIONS

Jacek JANISZEWSKI, jacek.janiszewski@wat.edu.pl, ORCID: 0000-0003-3783-8774

Ryszard WOŹNIAK, ryszard.wozniak@wat.edu.pl, ORCID: 0000-0002-5555-3126

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46
Military University of Technology, 2 Gen. Sylwestra Kaliskiego St. 00 – 908 Warsaw 46

DOI 10.5604/01.3001.0016.1105

Streszczenie: Rozwój kosmicznej techniki rakietowej w połowie XX wieku zintensyfikował badania w dziedzinie materiałów konstrukcyjnych stosowanych zarówno na rakiety, jak i zabezpieczenia pojazdów kosmicznych przed uszkodzeniami m.in. przez meteoryty. To z kolei wymusiło opracowanie laboratoryjnych układów miotających pociski z prędkościami hiperdźwiękowymi, umożliwiającymi badanie i modelowanie zjawisk zachodzących przy dużych prędkościach zderzenia. Obecnie do przyspieszania pocisków do prędkości hiperdźwiękowych stosuje się układy wykorzystujące energię wybuchu materiałów wybuchowych lub spalania paliw ciekłych, plazmy, energię pola elektromagnetycznego czy rozprężających się gazów lekkich. W niniejszej pracy dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych różnych układów miotających umożliwiających osiągnięcie prędkości wylotowych pocisku powyższej 3000 m/s. Szczególną uwagę zwrócono na dwustopniowe układy miotające wykorzystujące gazy lekkie takie, jak wodór lub hel. W artykule przedstawiono również historię i rozwiązanie konstrukcyjne pierwszego, i jak dotąd jedyne, polskiego dwustopniowego układu miotającego opracowanego w Wojskowej Akademii Technicznej, za pomocą którego w roku 1973 wystrzelono pocisk o masie 0,5 g z prędkością 4500 m/s. Artykuł kończy opis dwustopniowego układu miotającego, obecnie budowanego w Instytucie Techniki Uzbrojenia Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa, Wojskowej Akademii Technicznej – przy wydatnej pomocy HSW S.A. ze Stalowej Woli.

Słowa kluczowe: układy miotające, prędkości hiperdźwiękowe, balistyka

Abstract: The development of space rocket technology in the mid-twentieth century intensified research in the field of engineering materials used both for rockets and protection of space vehicles against damage, e.g., by meteorites. This development, in turn, forced the development of laboratory propulsion systems with hypersonic velocities, enabling the study and modelling of phenomena occurring at high impact velocities. Currently, to accelerate projectiles to hypersonic velocities, launching systems are applied that use the energy of the explosion of explosives or the combustion of liquid fuels, plasma, the energy of the electromagnetic field or light gases expanding. The work presents a review of the design solutions of various accelerators that enable the projectile to reach muzzle velocities above 3000 m/s. Particular attention has been paid to two-stage gas system, which uses light gases such as hydrogen and helium. The paper also presents the history and design of the first, and so far the only, Polish two-stage light gas gun developed at the Military University of Technology, with the help of which in 1973 a projectile weighing 0.5 g was fired at a speed of 4500 m/s. The paper ends with a description of the two-stage propellant system currently under construction at the Institute of Armament Technology, Faculty of Mechatronics, Armaments and Aviation, the Military University of Technology - with the considerable help of the HSW S.A. company from Stalowa Wola.

Keywords: propulsion systems, hypersonic velocities, ballistics

1. Wstęp

Balistyka końcowa, czy też szerzej fizyka zderzeń, to dział nauki obejmujący wiele obszarów zainteresowań naukowych, do których można zaliczyć: wojskowość, zagrożenia meteorytowe, niszczenie rakiet lub satelitów przez mikrometeoryty lub tzw. śmieci kosmiczne, zderzenia planet, asteroid itp., czy fuzję uderzeniową. We wszystkich tych obszarach wykorzystuje się wiedzę naukową z zakresu fizyki i/lub chemii uderzeniowej (np. uderzeniowego zagęszczania), w których zagadnienia związane z zachowaniem się materiałów w warunkach ekstremalnie wysokiego ciśnienia, naprężenia i szybkości odkształcenia odgrywają bardzo istotną rolę. Aby poznać i zrozumieć zjawiska i mechanizmy towarzyszące zderzeniom konieczne jest zastosowanie wysoce zaawansowanej aparatury, w tym laboratoryjnych układów miotających, zdolnych do przyspieszania modelowych pocisków do tzw. prędkości hiperdźwiękowych. W tym miejscu należy wyjaśnić znaczenie pojęcia „prędkość hiperdźwiękowa” lub zamiennie „prędkość hipersoniczna”. Niektórzy autorzy definiują ją jako prędkość poruszania się obiektu, który 5-krotnie przekroczył prędkość propagacji fali dźwiękowej w powietrzu, tj. prędkość 5 Ma (Ma – liczba Macha), co odpowiada prędkości około 1700 m/s. W obszarze mechaniki zderzeń, definicja ww. prędkości jest bardziej złożona, gdyż za prędkość hiperdźwiękową uważa się taką prędkość zderzenia, przy której naprężenie/ciśnienie, powstające w stałych materiałach zderzających się obiektów jest tak duże w stosunku do ich wytrzymałości, że ich zachowanie deformacyjne jest zbliżone do płynięcia cieczy. Z definicji tej wynika zatem, że prędkość hiperdźwiękowa może przyjmować różne wartości w zależności od właściwości fizyko-mechanicznych materiałów zderzających się obiektów. W przypadku typowych materiałów

1. Introduction

Terminal ballistics, or in general the physics of impacts, is a discipline of science comprising different scientific domains such as the military, threats of meteorites, destruction of spacecrafts or satellites by micrometeorites or the so called space rubbish, collisions of planets and asteroids, etc., or the impact fusion. All these domains employ the scientific knowledge on physics and/or chemistry of impact (e.g. impact densification) where the questions relating to behaviour of materials in conditions of extremally high pressure, and stress, and the rate of strain are of essential importance. Highly advanced instruments have to be used to recognise and understand the effects and mechanisms of collisions, including the laboratory propulsion systems which can accelerate the models of projectiles up to the hypersonic velocities. Here the term of hypersonic velocity has to be clarified a bit more. Some authors define it as the velocity of a moving object exceeding by 5 times the velocity of the sound wave in the air, i.e. Mach 5 corresponding to velocity of ca. 1700 m/s. In the domain of mechanics of impacts the definition of the above velocity is a bit more complex and the hypersonic velocity is deemed to be such one at which the stress/pressure existing in materials of solid colliding objects is so high above their strength that the effects of deformation are similar to the flow of a liquid. The definition assumes then that the hypersonic velocity may be different depending on physical-mechanical properties of materials of colliding objects. But in the case of typical structural materials used in the space or military technologies it is assumed that it is the velocity above 3000 m/s (11000 km/h, or Mach 8.8) (Zukas, 1990).

konstrukcyjnych, stosowanych w technice kosmicznej lub militarnej przyjmuje się, że jest to prędkość powyżej 3000 m/s (11000 km/h lub 8,8 Ma) (Zukas, 1990).

Na połowę XX wieku przypada bardzo intensywny rozwój różnych sposobów miotania pocisków do prędkości hiperdźwiękowych, wynikający głównie z podboju kosmosu przez ówczesne potęgi militarne i gospodarcze. W tym czasie opracowano wiele oryginalnych układów miotających, które do przyspieszania modelowych pocisków, tj. kul, walców, wykorzystują energię wybuchu materiałów wybuchowych lub spalania paliw ciekłych, plazmy, energię pola elektromagnetycznego czy rozprężających się gazów lekkich (Zukas, 1990). Spośród ww. metod miotania najbardziej popularne stały się dwustopniowe wodorowe lub helowe układy miotające, które współcześnie są wykorzystywane przez wiele ośrodków badawczych.

Dwustopniowy układ miotający zabudowano także w Polsce, w Wojskowej Akademii Technicznej, na początku lat 70-tych XX wieku. Za pomocą tego układu miotającego przeprowadzono wiele oryginalnych testów zderzeniowych z prędkościami rzędu kilku tysięcy metrów na sekundę. Niestety, prac z wykorzystaniem opracowanego działu dwustopniowego nie kontynuowano, co doprowadziło do sytuacji, że obecnie żaden polski ośrodek badawczy nie dysponuje układem miotającym umożliwiającym przyspieszanie pocisków do prędkości większych niż 3000 m/s (Czeladzki, 1973).

W ostatnich latach jednak obserwuje się w Polsce potrzebę podjęcia takich badań, dlatego w 2020 r. w Instytucie Techniki Uzbrojenia WML WAT podjęto inicjatywę ponownego opracowania i zbudowania układu miotającego, przeznaczonego do realizacji badań doświadczalnych z zakresu balistyki końcowej różnego typu pocisków/obiektów, np. miniaturowych pocisków amunicji strzeleckiej, mikrometeoroidów, imitatorów odłamków, itp.

In the half of the 20th century various methods of projectiles propulsion to the hypersonic velocities were intensely developed by military and economic powers of that time engaged in space exploration.

Many original propulsion systems were developed then employing the energy of explosion of blasting materials, or combustion of liquid propellants, or plasma, or electromagnetic field, or expansion of light gases (Zukas, 1990). Two stage propulsion systems on hydrogen or helium have become the most popular among those mentioned above as they are used now by many research centres.

A two stage propulsion system was also built in Poland at the Military University of Technology (MUT) in the beginning of 70-ties of the 20th century. A lot of original impact tests were carried out with this propulsion system at velocities of a few thousand metres per second. Unfortunately, the work with the use of the developed two stage gun was not continued what resulted in situation that now none of the Polish research centres has any propulsion system accelerating projectiles to the velocities above 3000 m/s (Czeladzki, 1973).

Nevertheless, in recent years a need was observed for such researches and for that reason in 2020 an effort was undertaken once again in the Institute of Armament Technology at the Aviation Mechanical Faculty (AMF) of MUT to develop and build a propulsion system designed for conducting experimental trials over the terminal ballistics of different types of projectiles/objects, for instance miniaturised rounds of small arms, micrometeorites, imitators of fragments, etc.

2. Metody miotania pocisków

Najczęściej stosowaną metodą miotania pocisków jest technika wykorzystująca energię rozprężających się gazowych produktów spalania prochów. Ten sposób miotania, jednakże, osiągnął współcześnie swoje szczytowe możliwości w przyspieszaniu do bardzo dużych prędkości, które ograniczają się praktycznie do wartości około 2000 m/s. Ta graniczna prędkość miotania prochowego jest konsekwencją istnienia pewnej bariery fizycznej, która wynika z tego, że molekuly produktów spalania prochów są na tyle ciężkie, że przy bardzo dużych prędkościach przepływu, ich energia wewnętrzna jest w całości zużywana na przyspieszanie jedynie swojej masy, a nie na przyspieszanie pocisku. Wprawdzie podejmuje się liczne wysiłki poprawy charakterystyk miotającej broni prochowej poprzez, np. stosowanie nowych materiałów miotających (Janzon i in., 2007; Badgujar i in., 2008), nowych rozwiązań konstrukcyjnych (np. układy z tzw. wędrującym ładunkiem – *ang. Travelling Charge System* lub z tzw. wędrującą komorą prochową – *ang. Serial Chamber Gun System*), czy też nowych sposobów zapłonu (np. układy miotające z zapłonikiem plazmowym typu ETC – *ang. ElectroThermal Chemical gun system*) (Leciejewski i Cudziło, 2013), to jednak trudno oczekiwać jakościowego postępu, przynoszącego znaczący wzrost maksymalnej prędkości wylotowej miotanych obiektów. Dlatego, w zastosowaniach badawczych wykorzystuje się układy miotające, których zasada działania bazuje na innych zjawiskach fizycznych lub wykorzystuje inne źródła energii do napędzania hiperdźwiękowego. Układy te można podzielić na: wybuchowe, plazmowe, elektromagnetyczne oraz układy na paliwo ciekłe i układy miotające na gazy lekkie (Zukas, 1990).

Wybuchowe układy miotające to tani i prosty sposób napędzania pocisków o nieskomplikowanym kształcie (dysk, kula, walec) do

2. Projectiles Propulsion Methods

Technique using the energy of expanding gaseous products of powder combustion is a most often used method for propulsion of projectiles. But this method of propulsion has reached now its maximal capacities in acceleration to very high velocities which in practice are limited to ca. 2000 m/s. This limit of powder propulsion velocity is a consequence of a physical barrier caused by the fact that at very high velocities of flows the molecules of powder combustion products are heavy enough to use their whole internal energy for acceleration of own mass instead of the projectile. Even if numerous attempts are taken to improve performance of propulsion powder weapons, for instance by application of new propulsion materials (Janzon and others, 2007; Badgujar and others, 2008), or new design solutions (e.g. Travelling Charge System, or so called Serial Chamber Gun System), or new methods of ignition (e.g. propulsion systems with plasma igniter of ETC type – ElectroThermal Chemical gun system) (Leciejewski and Cudziło, 2013), it is difficult to expect any breakthrough which could increase significantly the maximal muzzle velocity of projected objects. For this reason, the propulsion systems based on other physical effects or sources of energy are used for hypersonic velocities in experimental applications. These systems can be divided on explosive, plasma, electromagnetic, and the systems employing a liquid propellant or light gases (Zukas, 1990).

Explosive propulsion system is a cheap and simple method of propulsion of projectiles with a simple shape (disc, ball, cylinder) to velocities up to 6000 m/s. A simplest such system contains a cylindrical

prędkości rzędu 6000 m/s. Najprostszy taki układ składa się z cylindrycznego ładunku materiału wybuchowego z małą wnęką na powierzchni czołowej, w której umieszcza się pocisk (rys. 1a). W wyniku inicjacji ładunku materiału wybuchowego (MW), pocisk napędzany jest z bardzo dużym przyspieszeniem, kilka rzędów wyższym niż w klasycznych prochowych układach miotających. Z tego m.in. powodu, ten sposób napędzania ma duże ograniczenia co do kształtu pocisku oraz materiału, z którego jest zbudowany, gdyż w czasie gwałtownego napędzania może dochodzić do deformacji pocisku i ubytku jego masy. Do wybuchowych układów miotających zalicza się także ładunki kumulacyjne stosowane w pociskach przeciwpancernych oraz układy EFP (*ang. Explosively Formed Projectiles*) (Walters i Zukas, 1989).

Oryginalnym sposobem napędzania wybuchowego jest układ, w którym napędzanie pocisku odbywa się w wyniku sekwencyjnego odpalania ładunków materiału wybuchowego, które są rozmieszczone w komorze naboju oraz wzdłuż lufy i detonowane w chwili, gdy pocisk mija daną sekcję napędową. Ideę tego typu układu, w latach 40-tych XX wieku, zastosował w dziale wielokomorowym inż. Conders z niemieckiej firmy Rochling Steel Company, zajmującej się m.in. pociskami przeciwbetonowymi. Działo to, znane również jako: „*Flaissingen Lieschen*”, „*Hochdruckpumpe*” (HDP), „*Pompa wysokiego ciśnienia*”, „*Busy Lizzie*”, „*Centipede*” lub „*Vergeltungswaffe 3*”, stanowiło praktyczną realizację pomysłu działu opatentowanego w USA przez Lymana i Haskella na początku lat 80-tych XIX wieku (Witkowski, 1999; Ciepliński i Woźniak, 1995).

Bardzo duże prędkości napędzania (powyżej 10000 m/s) pocisków o małej masie (0,5-2,0 g) i wymiarach można osiągać dzięki zastosowaniu plazmowych układów miotających. Układy te umożliwiają wygenerowanie strumienia plazmy, którego prędkości przepływu mogą

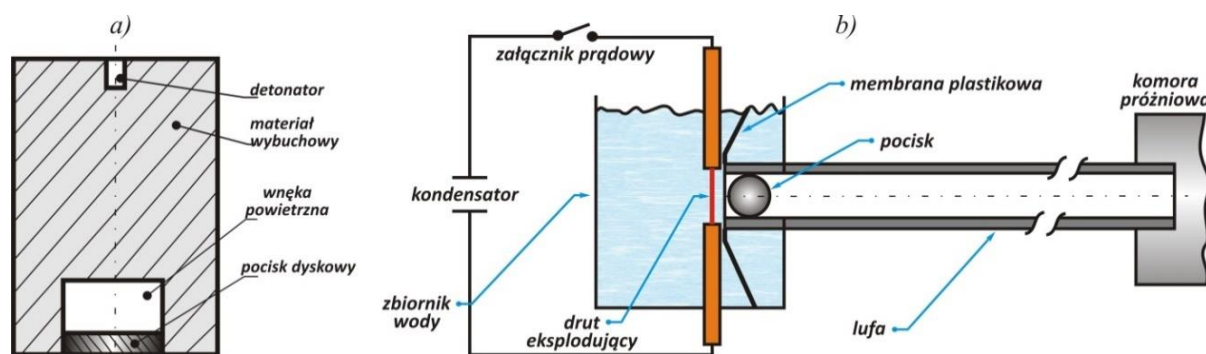
charge of explosive material with a small cavern on the head surface where a projectile is placed (Fig. 1a). As the result of detonation of the explosive material (EM) charge, the projectile is propelled with a very high acceleration which is greater by a few orders than in conventional systems with powder propulsion. For this reason this method of propulsion has great limitations over the projectile's shape or material as the rapid propulsion may deform the projectile and cause the loss of its mass. Shaped explosive charges used in antitank missiles and explosively formed projectiles (EFP) also belong to the explosive propulsion systems (Walters and Zukas, 1989).

Another system of explosive propulsion uses an original sequential method for detonation of explosive material charges which are located in the chamber and along the barrel to be blasted in the moment when the projectile passes by the particular propelling section. Idea of this system was employed in a multi-chamber gun in 40-ties of the 20th century by mechanical engineer Conders from German Rochling Steel Company dealing among others with anti-concrete projectiles. The gun was also named as: „*Flaissingen Lieschen*” „*Hochdruckpumpe*” (HDP), „*High Pressure Pump*”, „*Busy Lizzie*”, „*Centipede*” or „*Vergeltungswaffe 3*”, and was a practical realisation of a gun concept patented in the US by Lyman and Haskell at the beginning of 80-ties of the 19th century (Witkowski, 1999; Ciepliński and Woźniak, 1995).

Very high velocities of propulsion (above 10000 m/s) for projectiles with low mass (0.5-2.0 g) and size may be achieved by employment of plasma propulsion systems. These systems can generate the plasma jets with velocities of flow from a dozen up to a few dozen kil-

osiągać wartości od kilkunastu do kilkudziesięciu kilometrów na sekundę. Gdy w tak szybko przemieszczający się strumień plazmy zostanie wprowadzony miniaturowy pocisk, wtedy następuje jego przyspieszenie. Hiperdźwiękowe strumienie plazmowe najczęściej są generowane za pomocą tzw. liniowych ładunków wybuchowych bądź w układzie eksplodujących folii lub drutów (rys. 1b). Dodatkowo, jak pokazano na rys. 1b, eksplozję drutu wywołaną przepływem prądu o bardzo dużym natężeniu (niekiedy nawet rzędu 1 MA) przeprowadza się w zbiorniku wody w celu zwiększenia sprawności napędzania (Zukas, 1990).

ometres per second. A miniaturised projectile is accelerated after its introduction into such rapidly moving plasma jet. Hypersonic plasma jets are usually generated by the so called linear explosive charges, or in configuration of exploding foils or wires (Fig. 1b). And additionally, as it is shown in Fig. 1b, the explosion of a wire effected by the flow of very high intensity current (sometimes in order of 1 MA) is carried out inside a water container in order to increase the efficiency of propulsion. (Zukas, 1990)



Rys. 1. Wybuchowy (a) i plazmowy (b) układ miotający (Zukas, 1990)

Fig. 1. Explosive (a) and plasma (b) propulsion systems (Zukas on, 1990)

Detonator – Detonator

Materiał wybuchowy – Explosive material

Wnęka powietrzna – Air pocket

Pocisk dyskowy – Disc projectile

Załącznik prądowy – Electric current switch

Kondensator – Capacitor

Drut eksplodujący – Exploding wire

Zbiornik wody – Water container

Membrana plastikowa – Plastic membrane

Pocisk – Projectile

Lufa – Barrel

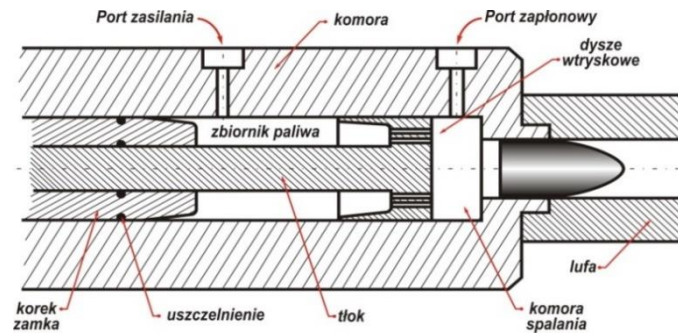
Komora próżniowa – Vacuum chamber

Dużą grupę układów miotających stanowią **działa na paliwo ciekłe lub gazowe**, w których wykorzystuje się obserwację, że gazy o małej masie cząsteczkowej zużywają znacznie mniej energii wewnętrznej (zmagazynowanej) do przyspieszenia swoich molekuł, a co za tym idzie osiągają dużo większe prędkości przepływu, tzw. prędkość ucieczki (*ang. escape velocity*) (Rosenberg i Dekel, 2016) niż molekuły gazowe spalania prochu. Dla przykładu gazy prochowe o temperaturze 3000 K

Guns using liquid or gaseous propellant belong to another numerous group harnessing the fact that gases of low molecular mass use significantly lower portion of internal (accumulated) energy to accelerate their molecules what is translated into much higher velocities of flow, called as escape velocities (Rosenberg and Dekel, 2016), than the powder combustion gaseous molecules. For instance, powder gases at temperature 3000 K have the escape velocity

osiągają prędkość ucieczki wynoszącą 16,1 km/s, podczas gdy wodór cząsteczkowy o temperaturze 1000 K rozpręża się z prędkością 21,0 km/s, a o temperaturze 5000 K – 44,6 km/s (Zukas, 1990). Jedną z koncepcji układu miotającego – rozwijaną w latach 1985-1995 również w WAT – wykorzystującą powyższe zjawisko jest układ na paliwo ciekłe, którego różne rozwiązania opisano w (Fedyna i Woźniak, 1995), a schemat najczęściej stosowanego układu zasilanego regeneracyjnie przedstawiono na rys. 2 (Mandzy, 2000; Ciepliński i in., 1993).

16.1 km/s, whereas the molecular hydrogen at temperature 1000 K expands with the velocity 21.0 km/s, and at temperature 5000 K – 44.6 km/s (Zukas, 1990). A system employing the above mentioned effect and the liquid propellant is one of conceptions of the propulsion system developed also in MUT within 1985-1995, and its different solutions were presented in (Fedyna and Woźniak, 1995), and the scheme of the most often used system with regenerating supply is presented in Fig. 2 (Mandzy, 2000; Ciepliński and others, 1993).



Rys. 2. Schemat układu miotającego na paliwo ciekłe zasilanego regeneracyjnie (na podstawie Mandzy, 2000)

Fig. 2. Scheme of propulsion system for liquid propellant with regenerating supply (basing on Mandzy, 2000)

Port zasilania – Supplying port
Komora – Chamber
Port zapłonowy – Ignition port
Dysze wtryskowe – Injection nozzles
Zbiornik paliwa – Propellant container

Lufa – Barrel
Komora spalania – Combustion chamber
Tłok – Piston
Uszczelnienie – Sealing
Korek zamka – Cork of bolt

W układzie tym tłok dzieli komorę (tzw. ładunkową) na dwie części: komorę spalania i zbiornik paliwa (komorę paliwową). Długość zbiornika paliwa, a w tym samym i jego objętość oraz maksymalny skok tłoka ogranicza zamek, w którym prowadzone jest tłoczysko z tłokiem. W głowicy tłoka znajdują się cylindryczne dysze wtryskowe, które w trakcie ładowania zbiornika paliwowa są zamknięte, co zapobiega przenikaniu paliwa do komory spalania przed strzałem. Proces strzału jest inicjowany przez urządzenie zapłono-

In this system the piston divides the chamber (called as loading chamber) on two parts: combustion chamber and fuel container (fuel chamber). The length of the fuel container, and by the same its capacity, and the maximal move of the piston is limited by the bolt which is a running sleeve for piston rod. The head of the piston houses cylindrical injection nozzles which are closed when the fuel container is loaded to prevent fuel penetration into the combustion chamber before the shot. Process of shooting is initiated by an

we, wytwarzające wstępne ciśnienie w komorze spalania, które powoduje przemieszczenie tłoka i sprężanie paliwa w zbiorniku paliwa. Pole powierzchni tłoka od strony komory spalania jest większe od pola powierzchni sprężającej paliwo, dzięki czemu ciśnienie w zbiorniku paliwa jest większe od ciśnienia w komorze spalania, co umożliwia wtrysk paliwa (przez dysze wtryskowe) do komory spalania. Po zapłonie tłok w dalszym ciągu jest przemieszczany do tyłu, wymuszając ciągle wtryskiwanie paliwa do komory spalania, dzięki czemu ciśnienie gazów zwiększa się do wartości ciśnienia forsowania, przy którym rozpoczyna się ruch pocisku. Pod wpływem ciśnienia gazowych produktów spalania paliwa, zwiększają się prędkość i droga tłoka oraz pocisku. Dopływ paliwa do komory spalania kończy się w chwili dosunięcia tłoka do czoła zamka. Od tej pory ciśnienie gazów w przestrzeni zapociskowej zmniejsza się. Układy na paliwo ciekłe zapewniają bardziej równomierny rozkład przebiegu ciśnienia gazów (bez charakterystycznego piku występującego w układach miotających prochowych), przez co zwiększa się sprawność układu (do ok. 35%), zmniejsza prędkość odrzutu i zwiększa trwałość broni (Ciepliński i Woźniak, 1995). Ponadto, pozwalają na przyspieszanie pocisków o stosunkowo dużej masie (nawet powyżej 1 kg) do prędkości powyżej 2000 m/s (Ciepliński i in., 1993).

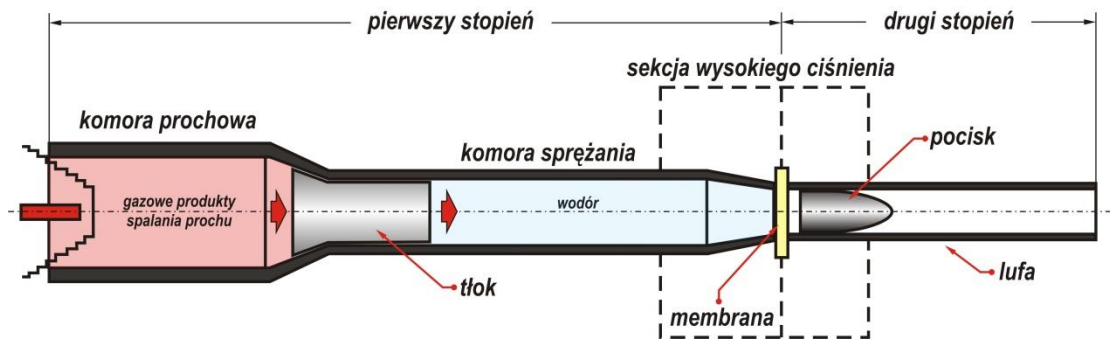
O wiele większe prędkości wylotowe (powyżej 11 km/s) osiągnąć są za pomocą **gazowych układów miotających**. Spotykane są różne rozwiązania, np. jednostopniowe z zapłonem mieszanki tlenowo-wodorowej lub helowej, jednostopniowe z zapłonem plazmowym (tzw. działa elektrotermiczne) lub dwu-, a nawet trójstopniowe, w których intensywne nagrzewanie gazów lekkich odbywa się w wyniku ich dynamicznej kompresji. Na rys. 3 przedstawiono schematyczną ilu-

stronę urządzenia tworzącego początkowe ciśnienie w komorze spalania, które przemieszcza tłok i spręża paliwo w zbiorniku. Powierzchnia tłoka od strony komory spalania jest większa od powierzchni sprężającej paliwo, dzięki czemu ciśnienie w zbiorniku paliwa jest większe od ciśnienia w komorze spalania, co umożliwia wtrysk paliwa (przez dysze wtryskowe) do komory spalania. Po zapłonie tłok w dalszym ciągu jest przemieszczany do tyłu, wymuszając ciągle wtryskiwanie paliwa do komory spalania, dzięki czemu ciśnienie gazów zwiększa się do wartości ciśnienia forsowania, przy którym rozpoczyna się ruch pocisku. Pod wpływem ciśnienia gazowych produktów spalania paliwa, zwiększają się prędkość i droga tłoka oraz pocisku. Dopływ paliwa do komory spalania kończy się w chwili dosunięcia tłoka do czoła zamka. Od tej pory ciśnienie gazów w przestrzeni zapociskowej zmniejsza się. Układy na paliwo ciekłe zapewniają bardziej równomierny rozkład przebiegu ciśnienia gazów (bez charakterystycznego piku występującego w układach miotających prochowych), przez co zwiększa się sprawność układu (do ok. 35%), zmniejsza prędkość odrzutu i zwiększa trwałość broni (Ciepliński i Woźniak, 1995). Ponadto, pozwalają na przyspieszanie pocisków o stosunkowo dużej masie (nawet powyżej 1 kg) do prędkości powyżej 2000 m/s (Ciepliński i in., 1993).

Gaseous propulsion systems provide much higher muzzle velocities (above 11 km/s). There are different solutions of them, e.g. single-stage with ignition of oxygen-hydrogen composition, or helium, and single-stage with plasma ignition (called as electrothermal guns), and double or even three-stage options where the lighter-than-air gases are intensively heated as an effect of their dy-

strację rozwiązania konstrukcyjnego dwustopniowego układu miotającego, które jest często stosowane w laboratoriach zajmujących się badaniem zjawisk towarzyszących zderzeniom obiektów kosmicznych (meteorytów, komet itp.) (Zukas, 1990; Mayer, 1994).

namical compression. Fig. 3 shows a schematic picture of a designing solution of a double-stage propulsion system which is often used in laboratories dealing with testing the effects connected with collisions of space objects (meteorites, comets, etc.) (Zukas, 1990; Mayer, 1994).



Rys. 3. Schemat dwustopniowego gazowego układu miotającego
(na podstawie (Zukas, 1990))

Fig. 3. Scheme of a double-stage gaseous propulsion system
(based on (Zukas, 1990))

Pierwszy stopień – First stage

Drugi stopień – Second stage

Komora prochowa – Powder chamber

Komora sprężania – Compression chamber

Sekcja wysokiego ciśnienia – High pressure section

Pocisk – Projectile

Gazowe produkty spalania prochu – Gaseous products of powder combustion

Wodór – Hydrogen

Tłok – Piston

Membrana – Membrane

Lufa – Barrel

Istota działania dwustopniowego gazowego układu miotającego bazuje na wykorzystaniu do miotania pocisków, energii rozprężania się gazów lekkich, tj. wodoru lub helu. Działo składa się z dwóch zasadniczych układów: zasilania i napędzania. Układ zasilania stanowi zespół urządzeń ciśnieniowych (pierwszy stopień) takich, jak: komora sprężania z komorą prochową, butle ze sprężonym wodorem lub helu z zaworami i manometrami oraz układ mocowania membrany ciśnieniowej. Natomiast układ napędzania (drugi stopień) składa się z lufy z przewodem gładkim (z przyłączami rozłącznymi, gwarantującymi szczelne połączenie z układem membrany) oraz z komory próżniowej (nie ma jej na rys. 3). Proces miotania pocisku za

Operation of the double-stage gaseous propulsion system is based on the expansion energy of lighter-than-air gases, e.g. hydrogen or helium, propelling the projectiles. The gun consists of two main systems of supply and propulsion. The supply system contains a set of pressurising devices (first stage) such as: compressing chamber with the powder chamber, bottles with compressed hydrogen or helium with valves and manometers, and a fitting for fixing the compression membrane. The propulsion system (second stage) consists of a smooth bore barrel (with disconnecting fixings securing tight connection with the membrane unit) and a vacuum chamber (it is not shown in Fig. 3). Projectile pro-

pomocą takiego układu przebiega następująco: odpowiednio dobrana porcja wodoru lub helu jest wpompowywana do przedniej części komory sprężania, tj. przestrzeni, która z jednej strony jest ograniczona metalową membraną, natomiast z drugiej – ruchomym tłokiem wykonanym z tworzywa sztucznego o jednorazowym zastosowaniu. Tłok jest elementem oddzielającym komorę sprężenia od tzw. komory prochowej, która stanowi integralną część komory sprężania. W komorze prochowej umieszcza się, w zależności od potrzeb, odpowiednią naważkę prochową. W rezultacie jej zapłonu powstają prężne gazy prochowe, które napędzają dynamicznie tłok sprężający hel (pierwszy etap napędzania). Dynamika tego sprężania jest na tyle duża, a ciśnienia sprężania na tyle wysokie, że zastosowany gaz lekki nagrzewa się do bardzo wysokiej temperatury, dzięki czemu gwałtownie zwiększa się jego prężność. Odpowiednio dobrana metalowa membrana (najczęściej dysk stalowy z nacięciami) uwalnia sprężony gaz z chwilą przekroczenia jej wytrzymałości mechanicznej na pęknięcie i rozpoczyna się drugi etap procesu przyspieszania pocisku (poruszającego się w długiej lufie), który w początkowej fazie znajduje się w przestrzeni za membraną.

Pierwszy dwustopniowy układ miotający wykorzystujący gaz lekki został skonstruowany przez W.D. Croziera i W. Hume'a z New Mexico School of Mines w 1946 r. Układ ten zawierał komorę sprężania o średnicy 57 mm, lufy kalibru i długości odpowiednio: 8,1 mm i 990 mm, 9,4 mm i 990 mm oraz 10,4 mm i 1 300 mm. Układ ten umożliwiał miotanie pocisków o masie 2,46-4,47 g z prędkościami mieszczącymi się w zakresie 3120-3750 m/s (Janzon i in., 2007). Natomiast, największe dotychczas zbudowane działo gazowe SHARP (*ang. Super High Altitude Research Project*) składa się z 100 mm

pulsion system works in following way: a suitably matched portion of hydrogen or helium is pumped into the frontal part of the compressing chamber, i.e. the space which from one side is limited by a steel membrane and from the other side by a movable piston made of a plastic for disposable use. The piston separates the compression chamber and so called powder chamber being an integral part of the compressing chamber. A suitable powder portion is placed in the powder chamber depending on the needs. As the result of its ignition there are generated expanding powder gases propelling dynamically the piston compressing the helium (the first stage of propulsion). Both the dynamics and the level of this compression are sufficiently high to heat the applied lighter-than-air gas to very high temperature what makes its dynamism rapidly increase. A suitably matched steel membrane (usually a steel disc with notches) releases the compressed gas, when its mechanical resistance against breaking is exceeded, to start the second stage of acceleration of the projectile (travelling inside a long barrel) which in the first phase is behind the membrane.

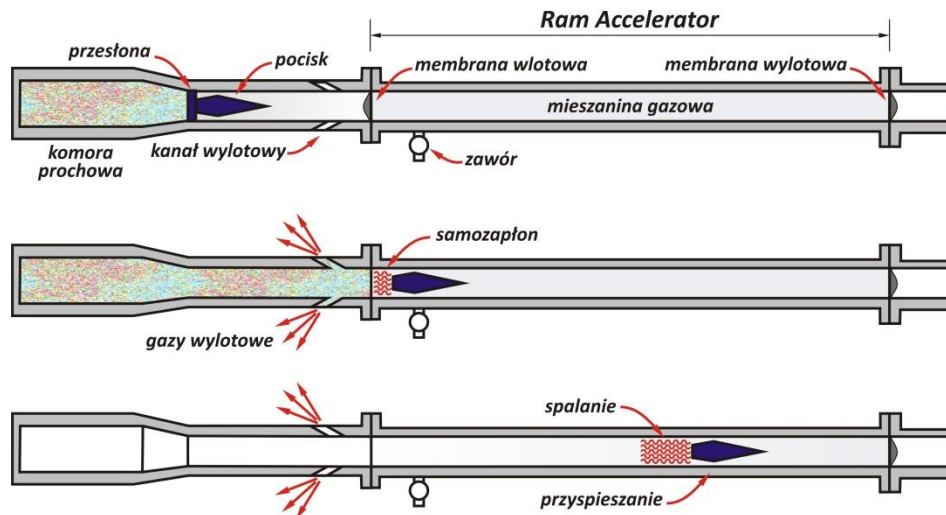
The first double-stage propulsion system using the lighter-than-air gas was designed by W.D. Crozier and W. Hume from New Mexico School of Mines in 1946. The system comprised a compressing chamber with diameter of 57 mm, and barrels with calibre and length respectively 8.1 mm and 990 mm, and 9.4 mm and 990 mm, and 10.4 mm and 1 300 mm. The system provided propelling of projectiles with the mass 2.46-4.47 g to velocities within 3120-3750 m/s (Janzon and others, 2007). The greatest gaseous gun SHARP (Super High Altitude Research Project) built up to now consists of 100 mm barrel with 47 m length

lufy o długości 47 m i komory sprężania o długości 82 m i o średnicy 360 mm (Darling, 2022).

Innym interesującym rozwiązaniem gazowego układu miotającego, będącego hybrydą prochowego i gazowego sposobu napędzania jest **działo typu RAM Accelerator** (Bruckner, 1997) (rys. 4).

and a compression chamber with 82 m length and 360 mm diameter (Darling, 2022).

A **gun of RAM Accelerator type** (Bruckner, 1997) (Fig. 4) is another interesting solution of gaseous propulsion system combining the powder and gaseous methods of propulsion.



Rys. 4. Schemat poglądowy działania układu miotającego typu RAM Accelerator (na podstawie Bruckner, 1997)

Fig. 4. A scheme illustrating operation of RAM Accelerator type propulsion system (basing on Bruckner, 1997)

Przesłona – Aperture

Pocisk – Projectile

Komora prochowa – Powder chamber

Kanał wylotowy – Output channel

Membrana wlotowa – Inlet membrane

Membrana wylotowa – Outlet membrane

Mieszanina gazowa – Gaseous composition

Zawór – Valve

Samozapłon – Self-ignition

Gazy wylotowe – Exhaust gases

Spalanie – Combustion

Przyspieszanie – Acceleration

Pozwala ono na miotanie pocisków z prędkościami dochodzącymi do wartości nawet 8 km/s. Urządzenie to bazuje na koncepcji scalonego silnika odrzutowego. Zasada jego działania polega na tym, że w pierwszym etapie pocisk podkalibrowy o specjalnej konstrukcji jest przyspieszany za pomocą prochowego układu miotającego. Następnie, po przebicciu membrany, pocisk jest przyspieszany ciśnieniem gazów powstałych podczas spalania mieszanki gazowej (paliwo z utleniaczem),

It can be used to propel the projectiles even to velocities of 8 km/s. The system is based on a concept of an integrated jet motor. The principle of its operation is based on acceleration in the first stage of a sub-calibre special design projectile by a powder propulsion system. In the next step, projectile after penetrating the membrane is accelerated by the pressure of gases created at combustion of gaseous composition (fuel with oxidiser) which in the first mo-

która początkowo wypełnia przewód lufy przed pociskiem. W wyniku przemieszczania się pocisku w lufie, mieszanka gazowa przedostaje się dzięki dyszom (kanałom) wykonanych w pocisku, do przestrzeni zapociskowej, gdzie dochodzi do jej samozapłonu.

Podstawową zaletą układu miotającego typu RAM Accelerator jest to, że pocisk jest napędzany prawie ze stałym przyspieszeniem podczas przemieszczania się w lufie. W standardowym dziale prochowym, ciśnienie wywierane na pocisk osiąga maksymalną wartość, gdy pocisk znajduje się jeszcze w początkowym położeniu. Gdy pocisk przemieszcza się wzdłuż przewodu lufy, wielkość przyspieszenia pocisku zmniejsza się w wyniku eksponentyjnego spadku ciśnienia gazu, i ostatecznie osiąga wartości na tyle małe, że nawet zastosowanie dłuższej lufy nie wywołuje zwiększenia prędkości wylotowej pocisku. Napędzanie w układzie typu RAM Accelerator przebiega odmiennie. W tym przypadku pocisk jest napędzany ciśnieniem spalającej się mieszaniny gazowej, która stale wypełnia pewną przestrzeń przemieszczającą się tuż za pociskiem. Prowadzi to do powstawania stałej siły przyspieszającej pocisk, która utrzymuje się tak długo, jak długa jest lufa i czas potrzebny pociskowi na jej przebycie. Stąd, zasadne jest stosowanie długich luf w układach typu RAM Accelerator, aby osiągać prędkości hiperdźwiękowe.

Ostatnią grupą układów miotających umożliwiających osiągnięcie bardzo dużych prędkości wylotowych są tzw. **działa elektromagnetyczne**. Wyróżnia się dwie odmiany tego typu układów, tj. cewkowe nazywane także Gaussa (*ang. coilgun*) i szynowe (*ang. railgun*) (rys. 5) (Sharoni i Bacon, 1997; Ciepliński i in., 1993). Obydwa układy do napędzania pocisku wykorzystują energię silnego pola elektromagnetycznego.

W przypadku **układu cewkowego** pole

fills the barrel's bore in front of the projectile. In effect of projectile travelling inside the barrel the gaseous composition is transferred via the nozzles (channels) made in the projectile into its back space where the process of its self-ignition takes place.

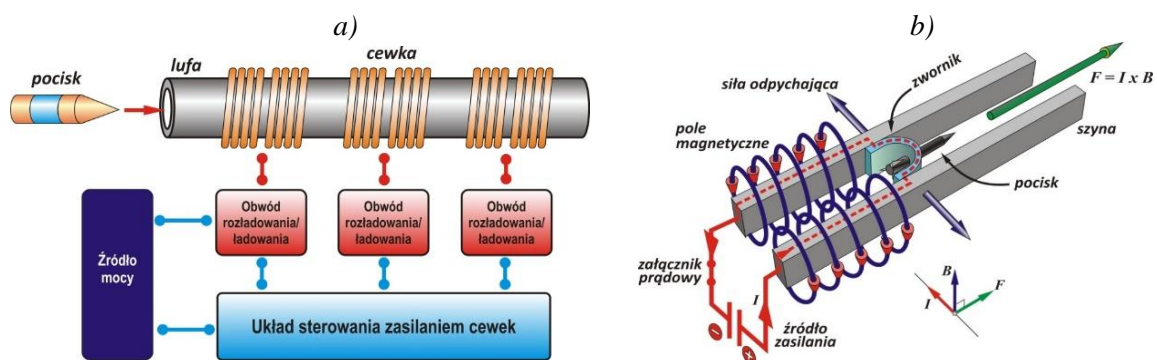
The main advantage of the RAM Accelerator type propulsion system is the fact that the projectile is propelled in the barrel almost with a constant acceleration. In a standard powder gun the pressure exerted into the projectile has the maximum value when it still is in an initial position. When the projectile travels along the barrel the value of projectile's acceleration decreases in effect of an exponential decrease of gas pressure to reach finally so low values that even application of a longer barrel does not increase the projectile's muzzle velocity. The propulsion in RAM Accelerator system works in a different way. In this case the projectile is propelled by the pressure of burning gaseous composition which permanently fills up a moving space placed just behind the projectile. It creates a permanent force lasting and accelerating the projectile until the projectile travels the whole length of the barrel. Hence, the application of long barrels is reasonable in the RAM Accelerator type systems for reaching the hypersonic velocities.

So called **electromagnetic guns** belong to the last group of propulsion systems providing very high values of muzzle velocities. Two versions of these systems can be distinguished, i.e. coil gun systems named also as Gauss' guns, and railgun systems (Fig. 5) (Sharoni and Bacon, 1997; Ciepliński and others, 1993). Both projectile propulsion systems employ the energy of strong electromagnetic field for projectile propulsion.

In the case of a **coil system** the elec-

elektromagnetyczne powstaje w wyniku rozładowania baterii kondensatorów przez zespół cewek lub elektromagnesów (rys. 5a). W chwili strzału rozładowanie kondensatorów wywołuje powstanie silnego impulsu elektromagnetycznego, który początkowo wciąga pocisk znajdujący się na jednym z końców cewki, a następnie gwałtownie go przyspiesza. Napędzanie pocisku odbywa się na odcinku odpowiadającym połowie długości cewki, po czym układ sterowania musi być odłączony od zasilania danej cewki, aby dalszy ruch pocisku nie był hamowany na odcinku drugiej połowy cewki. Niemalże w tej samej chwili impuls prądowy jest z kolei podawany na drugą sąsiadującą cewkę, która zwiększa prędkość pocisku. W zależności od liczby zastosowanych cewek, cały proces załączania i odłączania zasilania kolejnych sekcji cewkowych jest powtarzany.

tromagnetic field is generated as a result of discharging a battery of capacitors through a network of coils or electromagnets (Fig. 5a). In the moment of shot the discharge of capacitors generates a strong electromagnetic pulse which first pulls in a projectile placed at one of coil ends, and next accelerates it rapidly. Propulsion of the projectile takes place on the section corresponding to the half of the coil length, and then the control unit has to be switched out from the supply of a particular coil in order to avoid projectile's braking on the second section of the coil. Almost at the same time the electric current pulse is on the adjacent coil which increases the velocity of projectile. Depending on the number of applied coils the whole process of switching on and off the consecutive sections of coils is repeated.



Rys. 5. Elektromagnetyczne układy miotające:
 a) schemat układu cewkowego (na podstawie (Su-Jeong Lee i in., 2013);
 b) schemat układu szynowego (Janiszewski i Woźniak, 2015)

Fig. 5. Electromagnetic propulsion systems:
 a) scheme of the coil system (basing on Su-Jeong Lee and others, 2013);
 b) scheme of the rail system (Janiszewski and Woźniak, 2015)

Pocisk – Projectile

Lufa – Barrel

Cewka – Coil

Źródło mocy – Power source

Obwód rozładowania/ładowania – Circuit of loading/unloading

Załącznik prądowy – Current switch

Siła odpychająca – Repelling force

Pole magnetyczne – Magnetic field

Zwochnik – Short circuit armature

Szyna – Rail

Układ sterowania zasilaniem cewek – Coil supply control unit

Źródło zasilania – Supply source

W zbudowanych dotychczas cewkowych układach miotających liczba cewek wynosiła nawet kilkadziesiąt, a osiągnięte prędkości wylotowe pocisków o stosunkowo dużych masach przekraczały 2000 m/s. Najważniejszą zaletą tego sposobu napędzania, oprócz możliwości osiągnięcia dużych prędkości, jest fakt, że nie występuje problem zużycia przewodu lufy wynikający z braku tarcia pomiędzy powierzchniami kontaktowymi pocisku i lufy. W przeciwieństwie do konwencjonalnej broni prochowej, powierzchnie prowadzące działa cewkowego nie mają fizycznego kontaktu z powierzchnią boczną pocisku, gdyż po pierwsze – pocisk ma nieco mniejszą średnicę, a po drugie – pole magnetyczne centruje pocisk w osi lufy. Do cennych zalet działa cewkowego – ze względu na zastosowania militarne – jest także to, że procesowi strzału nie towarzyszą zjawiska mogące zdradzać jego pozycję na polu walki, tj. huk i błysk wystrzału. Do największych trudności związanych z budową i eksploatacją tego typu układu miotającego jest konieczność opracowania bardzo dokładnego systemu monitorującego ruch pocisku wzdłuż sekcji cewkowych oraz bardzo szybkiego systemu sterującego załączaniem i odłączaniem cewek, o wysokiej sprawności i o bardzo krótkiej zwłoce zadziałania (liczonej w ułamkach mikrosekund), a ponadto zdolnego do przenoszenia bardzo dużych impulsów prądowych.

Zasada działania i rozwiązanie konstrukcyjne **działa szynowego** są prostsze od cewkowego układu miotającego. Pocisk w dziale jest pozycjonowany za pomocą specjalnego sabotu, w skład którego wchodzi tzw. zwornik, który swoimi powierzchniami bocznymi styka się z dwoma odizolowanymi i równoległymi szynami biegnącymi wzdłuż działa (rys. 5b). Szyny, zwornik oraz źródło zasilania wraz załącznikiem prądowym stanowią jeden obwód elektryczny. Gdy w tym obwodzie popłynie prąd, wokół szyn i zwornika powstaje układ pól elektromagne-

There was even a few dozen coils integrated in one coil propulsion system built up to now and the muzzle velocities of projectiles with relatively high masses exceeded 2000 m/s. The lack of any friction between contact surfaces of projectile and barrel, and by the same any wearing of the barrel bore, is the most important advantage of this propulsion method beside the high velocities. In opposite to conventional powder guns the leading surfaces of the coil are not in any physical contact with the side surface of projectile, firstly because the projectile has a bit smaller diameter, and secondly because the magnetic field centres the projectile into the barrel's axis. Another benefit of the coil gun, interesting for military applications, is a lack of effects of noise and flash during the shot what may prevent its localisation on the battle field. Design of a precise system monitoring the movement of the projectile along coil sections and switching on and off the coils, with high efficiency and extremely short delay (parts of microseconds) and capable for transferring current pulses of very high intensity, is the greatest challenge connected with preparation and use of such propulsion systems.

Principle of operation and design solution of a **rail gun** are simpler than for the coil propulsion system. A projectile is positioned in the gun by a special sabot comprising an armature, and the side surfaces of it have a contact with two isolated parallel rails running along the gun (Fig. 5b). The rails and the armature and a source of supply with the current switch create one electric circuit. When the current is on in the circuit then around the rails and armature the electromagnetic field is generated which induces the electrodynamic forces trying to move the rails outside and shift

tycznych, który indukuje siły elektrodynamiczne chcące rozsunąć szyny i przemieścić zwornik zgodnie z kierunkiem wektorów przedstawionych na rys. 5b. Ponieważ szyny są sztywno zamocowane, a jedynym ruchomym elementem w tym układzie jest zwornik, dlatego siły elektromagnetyczne wykonują pracę głównie na przemieszczenie zwornika i zamocowanego w nim pocisku. Za pomocą dotychczas zbudowanych, laboratoryjnych dział szynowych osiągnano dla lekkich pocisków (o masie 3 g) prędkości, wynoszące ok. 6,5 km/s. Analizy teoretyczne pozwalają jednakże stwierdzić, że możliwe jest osiągnięcie prędkości nawet 15 km/s (Zukas, 1990; Mayer, 1994).

3. Zastosowanie hiperdźwiękowych układów miotających

W zależności od wykorzystywanego chemicznego lub/i fizycznego zjawiska, zaprezentowane wyżej hiperdźwiękowe układy miotające mają mniej lub bardziej złożone konstrukcje, które powodują, że zazwyczaj są nieprzydatne do użycia w celach typowo militarnych. Stąd większość przedstawionych tutaj układów miotających jest wykorzystana głównie w badaniach naukowych, których celem jest poznanie zjawisk towarzyszących ruchowi ciał i ich zderzeniom z prędkościami hiperdźwiękowymi. Za przykład może posłużyć dwustopniowe działo gazowe JASPER (ang. the Joint Actinide Shock Physics Experimental Research) (rys. 6) zbudowane w Lawrence Livermore National Laboratory USA (LLNL, 2022). Jest to stacjonarny, laboratoryjny układ miotający o długości lufy 20 m, umożliwiający napędzanie pocisków o stosunkowo dużych masach (od 16,5 do 26,5 g) do prędkości około 7500 m/s. Tego typu układy miotające są m.in. na wyposażeniu takich ośrodków badawczych, jak: Instytut Ernsta Macha (maksymalna prędkość – 7,8 km/s dla

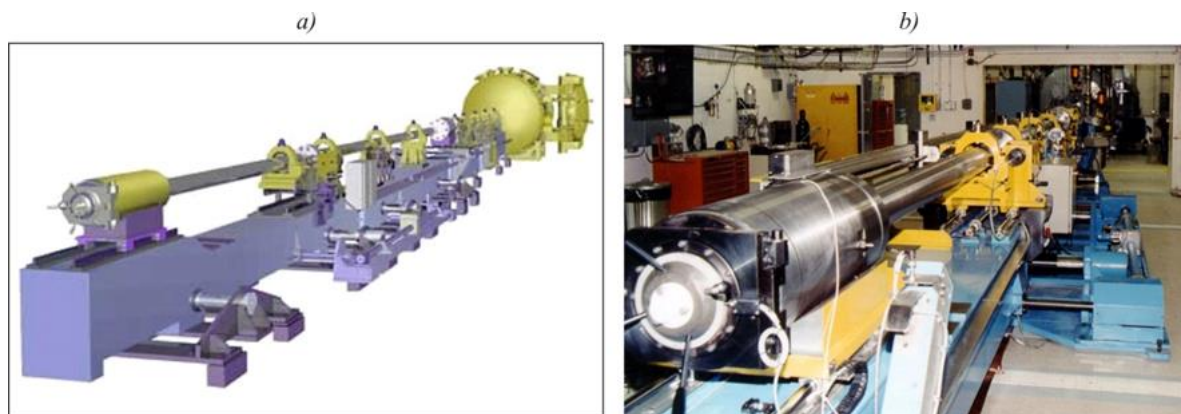
the armature according to direction of vectors shown in Fig. 5b. As the rails are rigidly fastened and the armature is the only one movable component of the system then the electromagnetic forces mainly perform the work over the displacement of the armature with the projectile. The laboratory designs of rail guns which were built up to now provided the velocities ca. 6.5 km/s for low mass projectiles (3 g). But theoretical studies show that even velocities of 15 km/s can be achieved (Zukas, 1990; Mayer, 1994).

3. Application of Hypersonic Propulsion Systems

Depending on employment of a chemical or/and physical effect the hypersonic propulsion systems presented above have more or less complex structures what causes that they usually are not prepared for any military application. Hence, the most of propulsion systems presented here is mainly used for scientific researches aimed to recognise the effects accompanied to movement of objects and their collisions at hypersonic velocities. An example of this solution is the double-stage gaseous gun JASPER (the Joint Actinide Shock Physics Experimental Research) (Fig. 6) built in Lawrence Livermore National Laboratory USA (LLNL, 2022). It is the stationary laboratory propulsion system with 20 m long barrel propelling the projectiles with relatively high masses (from 16.5 to 26.5 g) to velocities ca. 7500 m/s. Such propulsion systems are among others on the inventory of following research centres: Ernst Mach Institute (maximal velocity – 7.8 km/s for projectile with the mass of 100 g) (Lexow

pocisku o masie 100 g) (Lexow i in., 2013), czy Francusko-Niemiecki Instytut badawczy w Saint-Louis (maksymalna prędkość pocisku 7,0 km/s) (ISL, 2022). Przedstawione wyżej układy były celem wizyt naukowych autorów niniejszego artykułu.

and others, 2013), or French-German Research Institute in Saint-Louis (maximal velocity of projectile 7.0 km/s) (ISL, 2022). The systems presented above were visited for scientific purposes by the authors of the present paper.



Rys. 6. Model 3D (a) i widok (b) dwustopniowego działu gazowego JASPER
(dane ze strony internetowej, 2022)

Fig. 6. Model 3D (a) and view (b) of double-stage gaseous gun JASPER
(data from internet, 2022)

Drugim obszarem niemilitarnych zastosowań ww. układów, przewidywanych w przyszłości, jest transport towarów, a nawet ludzi na orbitę okołozemską (Schroeder i in., 1989; McNab, 2003). Rozważa się użycie do tego celu głównie dwóch sposobów napędzania, tj. układu typu RAM Accelerator (rys. 7a) lub/i układu elektromagnetycznego (szynowego lub cewkowego – rys. 7b i 7c). W tym przypadku napędzanie kapsuły następowaloby na stosunkowo długiej drodze, rzędu kilku lub nawet kilkunastu kilometrów.

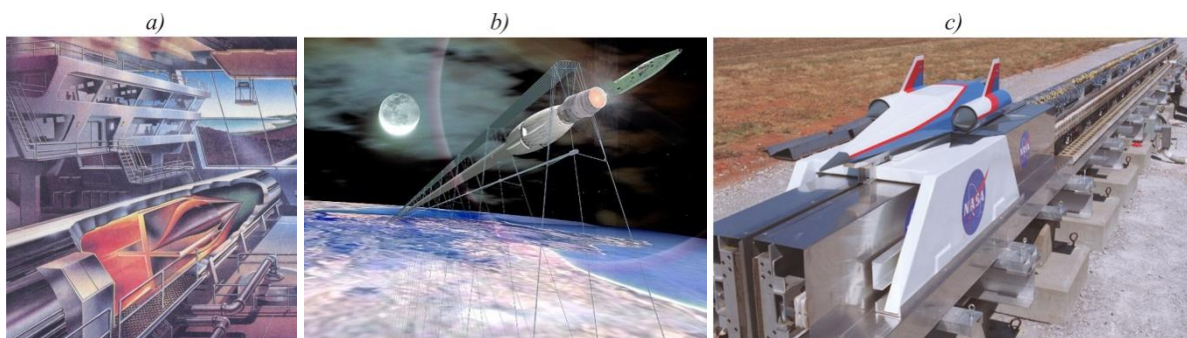
Od wielu lat typowo wojskowe zastosowanie znajdują niektóre wybuchowe układy miotające. Przykładem są układy kumulacyjne i pociski formowane wybuchowo EFP, obecnie wykorzystane w różnych rodzajach amunicji przeciwpancernej, począwszy od granatów i min, poprzez głowice granatników przeciwpancernych i pociski artyleryjskie, a na raketowych pociskach kierowanych, tor-

Transport of goods and even people in the future on the circum-earth orbit is a second domain of nonmilitary applications (Schroeder and others, 1989; McNab, 2003). Mainly two methods of propulsion are considered to be used for it, i.e. the system of RAM Accelerator type (Fig. 7a) or/and the electromagnetic system (rail or coil system – Fig. 7b and 7c). In this case a capsule could be propelled on a relatively great distance of the order of a few or even a dozen kilometres.

Some explosive propulsion system have been used by the army for many years. Among them there are for instance the shaped charge systems and explosively formed projectiles (EFP) currently used in different types of antitank munitions, starting from the grenades and mines, and going through the heads of antitank grenade launchers and artillery shells, and ending

pedach i bombach lotniczych kończąc. Pomimo dużych zdolności do napędzania (czoło strumienia kumulacyjnego przemieszcza się typowo z prędkością 8000 m/s, zaś pocisk EFP – 2500-3000 m/s) zasięg napędzanego wybuchowo pocisku jest bardzo mały w stosunku do innych układów miotających. W przypadku klasycznego ładunku kumulacyjnego, strumień kumulacyjny fragmentuje i rozprasza się już po przebyciu drogi kilku metrów. Większy zasięg rażenia posiadają pociski formowane wybuchowo, które skutecznie rażą cele nawet w odległości kilkadziesiąt metrów (Walters i Zukas, 1989). Jest to nadal zasięg zbyt mały, aby skutecznie niszczyć cele na znacznych odległościach. Dlatego tego typu układy są przenoszone za pomocą różnych nosicieli (np. pociski artylerii lufowej lub raketowej) i detonowane w pobliżu celu, lub są one wykorzystywane do niszczenia celów (pocisków) na małych odległościach, jak ma to miejsce w przypadku min burtowych lub kasetowych pancerzy reaktywnych czy w niektórych systemach opancerzenia aktywnego (Zahn, 2015).

on guided missiles, torpedoes, and plane dropped bombs. Despite high capacities for propelling (the front of the cumulative jet typically travels with velocity 8000 m/s, and the EFP – 2500-3000 m/s) the range of the explosively propelled projectile is very low comparing to other propulsion systems. In the case of a classical shaped charge the cumulative jet is fragmented and dispersed just after travelling a few metres. The explosively formed projectiles have a greater range of hitting and can effectively strike the targets even at the distance of a few dozen metres (Walters and Zukas, 1989). It is still a bit low range to destroy efficiently the targets at significant distances. It is why the systems of this type are born by different carriers (e.g. projectiles of rocket or gun artillery) and detonated near the target, or they are used to destroy targets (projectiles) at low distances as it is the case for ship's side mines or segmented reactive armours or for some systems of active armours (Zahn, 2015).



Rys. 7. Wizja futurystyczna transportu orbitalnego za pomocą układu RAM Accelerator (a) lub szynowej wyrzutni elektromagnetycznej (b) oraz widok wyrzutni szynowej do przyspieszania modeli przyszłościowych statków orbitalnych (NASA, 2022)

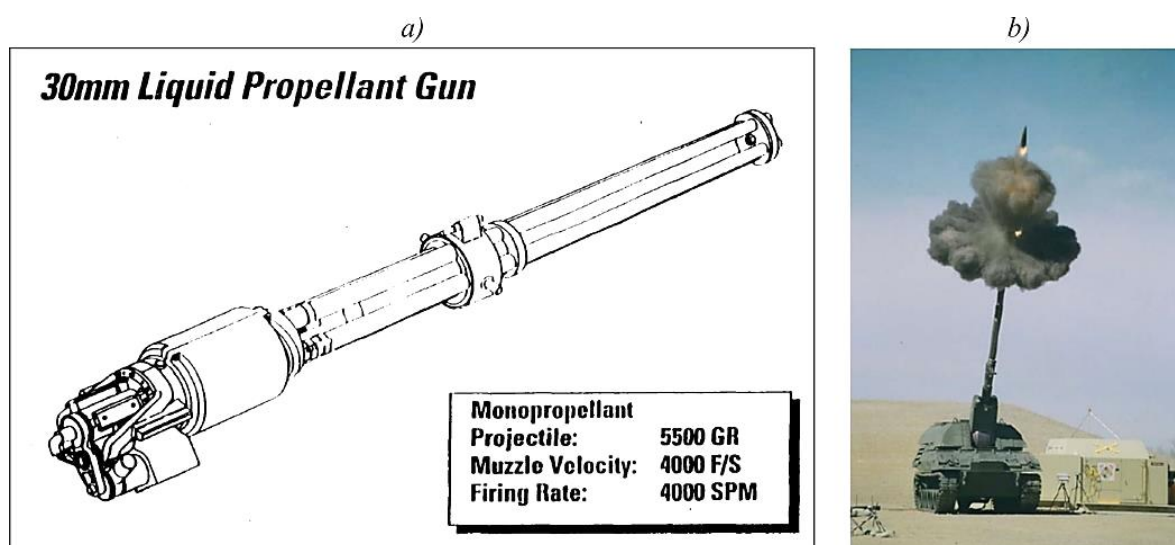
Fig. 7. Futuristic vision of orbital transport by RAM Accelerator system (a), or electromagnetic rail launcher (b), and a view of the rail launcher for acceleration of future models of orbital spaceships (NASA, 2022)

Wiele cech pożądaných ze względu na wojskowe i cywilne zastosowania posiadają układy na paliwo ciekłe. Wśród wielu zalet

The liquid propellant systems represent many characteristics desirable for civilian or military applications. The most important

najważniejsze to: zmniejszenie całkowitej masy układu miotającego, wynikające z braku łuski i większej energetyczności paliwa ciekłego, możliwość zwiększenia jednostki ognia przy zachowaniu dotychczasowej masy danego systemu broni, możliwość zwiększenia prędkości początkowej, a więc i donośności pocisków, płynna regulacja donośności, możliwość zasilania różnej pokładowej broni lufowej ze wspólnego zbiornika paliwa oraz zmniejszenie kosztów wytwarzania amunicji. Wymienione zalety inspirowały od dziesięcioleci konstruktorów i naukowców do opracowania konstrukcji broni bazującej na idei układu miotającego na paliwo ciekłe. Już podczas II wojny światowej czyniono wiele wysiłków nad opracowaniem i wdrożeniem do użycia tego typu broni. Także w czasach współczesnych podejmowane były prace w tym zakresie (Fedyna i Woźniak, 1995). Przykładem może być demonstrator 30 mm działka na paliwo ciekłe, dwustopniowego z wędrującym ładunkiem, dzięki któremu osiągnano prędkości ok. 3100 m/s (rys. 8a) (Mandzy, 2000). Innym przykładem prac nad wprowadzeniem systemów broni na paliwo ciekłe był program działka samobieżnego Crusader prowadzony przez ośrodki badawczo-rozwojowe armii USA (rys. 8b) (Adams i Barth, 2008). Niestety, program ten został wstrzymany w 2002 r., podobnie jak wiele innych podobnych projektów, z powodu wielu problemów technicznych i technologicznych. W przypadku programu ww. działka samobieżnego głównym powodem zaprzestania dalszych prac była zbyt duża szybkość reakcji spalania paliwa, w efekcie której następował gwałtowny wzrost ciśnienia podczas wtrysku paliwa do komory spalania, prowadzący do uszkodzenia działka. Wprawdzie podjęto próby spowolnienia reakcji spalania paliwa, ale bardzo skomplikowało to konstrukcję całego systemu artyleryjskiego, więc podjęto decyzję o zakończeniu programu badań.

ones among many advantages are: reduction of overall mass of the propulsion system due to the lack of a case and to the greater energetic value of the liquid propellant, possibility for increasing the fire unit at preservation of the existing mass of a weapon system, and for increasing the muzzle velocity and the range of shells, fine control of the range, possibility for supplying different onboard barrel weapon systems with a common fuel tank and reduction of costs for production of ammunition. These advantages have inspired designers and scientists for decades to develop weapon solution basing on the idea of liquid propellant propulsion system. Just during the WWII a lot of effort was put on development and implementation of such weapon. The work on it was also undertaken in present times (Fedyna and Woźniak, 1995). It was for instance a demonstrating model of 30 mm double-stage liquid propellant gun with travelling charge providing the velocities of ca. 3100 m/s (Fig. 8a) (Mandzy, 2000). Another example of work over implementation of liquid propellant weapon systems was program of self-propelled gun Crusader led by research-development centres of the US army (Fig. 8b) (Adams and Barth, 2008). Unfortunately, the program was interrupted in 2002, like many other similar projects, due to numerous technical and technological problems. In the case of the above mentioned self-propelled gun the main reason for interrupting further work was an excessively high rate of fuel combustion reaction leading to a pressure surge at injection of the fuel into the combustion chamber, and finally to destruction of the gun. Despite the efforts to slow the reaction of fuel combustion it proved to complicate enormously the design of the whole artillery system and the decision was made to terminate the tests.



**Rys. 8. Demonstrator 30 mm działka systemu Gatlinga na paliwo ciekłe (a)
działo samobieżne Crusader podczas testów z układem miotającym na paliwo ciekłe (b)**
(Mandzy, 2000; Adams i Barth, 2008)

**Fig. 8. Demonstrating model of 30 mm Gatling's system gun on liquid propellant (a)
self-propelled Crusader gun during tests with the liquid propellant propulsion system (b)**
(Mandzy, 2000; Adams and Barth, 2008)

W przeciwieństwie do ww. systemów miotających największe perspektywy rozwoju i potencjalnego zastosowania militarnego i cywilnego mają układy elektromagnetyczne. Na podstawie przeglądu literaturowego oraz liczby doniesień prasowych i publikacji naukowych można zauważyć, że w ciągu ostatnich dwudziestu lat, bardzo wzrosło zainteresowanie elektromagnetycznym sposobem napędzania oraz dokonano dużego postępu w doskonaleniu konstrukcji dział elektromagnetycznych i technologii stosowanych do jej wytworzenia. Szerszy opis przykładów zastosowania elektromagnetycznych układów miotających przed-stawiono w (Janiszewski i Woźniak, 2015).

4. Historia pierwszego polskiego dwustopniowego układu miotającego

Pierwsze prace nad opracowaniem hiperdźwiękowego układu miotającego w Polsce podjął w 1970 r. ppłk mgr inż. Marian Jan

In opposite to the above mentioned propulsion systems the greatest perspectives for development and potential military and civilian applications may appear for electromagnetic systems. Basing on literature studies and numbers of press news and scientific publications it may be noted that within recent twenty years the interest in electromagnetic method of propulsion has increased significantly and great progress was made in improving designs and production technologies of electromagnetic guns. More detailed description of examples of applications for electromagnetic propulsion systems is presented in (Janiszewski and Woźniak, 2015).

4. The History of the First Polish Double-stage Propulsion System

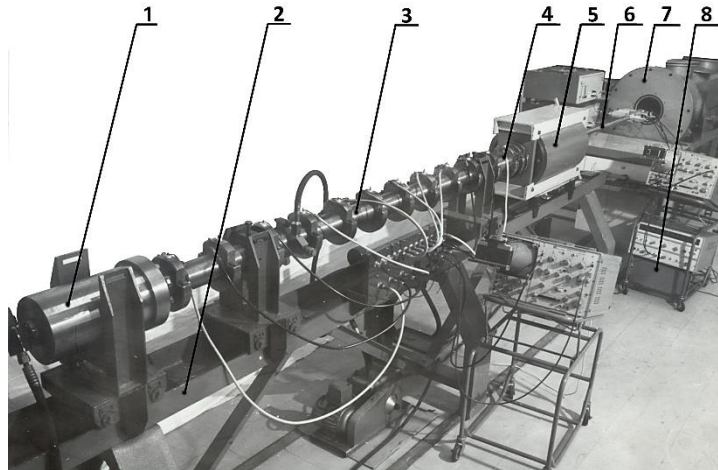
The first work on development of a hypersonic propulsion system in Poland started in 1970 and was conducted by Lt. Col. Mari-

Czeladzki (ur. 1930 r. – zm. 1992 r.). Był on pracownikiem Katedry Uzbrojenia Ogólnowojskowego Wydziału Elektromechanicznego Uzbrojenia Raketowego (WEMUR) Wojskowej Akademii Technicznej (obecnie Zakład Broni i Amunicji Instytutu Techniki Uzbrojenia Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa WAT). W ramach swojej rozprawy doktorskiej (Czeladzki, 1974) (promotor: doc. dr hab. inż. Wiktor Jungowski) opracował on i przeprowadził badania modelowe (teoretyczne) dwustopniowego układu miotającego, a następnie wykonał wiele eksperymentów, w wyniku których otrzymał oryginalne wyniki. Na ich podstawie m.in. wskazał kierunki dalszych prac mających na celu zwiększenie prędkości pocisków do 6000 m/s, a po modernizacji komory spalania oraz zastosowaniu tłoków o większej wytrzymałości i prochów o wysokich parametrach energetycznych – nawet 10000 m/s. Pierwsze, wstępne wyniki swoich badań zaprezentował w grudniu 1973 r. (Czeladzki, 1973).

Zbudowane przez ppłk. mgr. inż. Marianna Czeladzkiego stanowisko badawcze przedstawiono na rys. 9 i 10. Składało się ono z trzech głównych podzespołów: (1) dwustopniowego układu miotającego na gaz lekki, umożliwiającego wystrzeliwanie pocisków o masie od 0,1 do 5,0 g z prędkością od 2000 do 6000 m/s; (2) aparatury kontrolno-pomiarowej, służącej do określania prędkości pocisku, prędkości tłoka oraz ciśnienia gazu w wybranych punktach układu miotającego; (3) ramy toru balistycznego, zawierającego podstawę układu miotającego i kulochwyt, który umożliwiał także obserwację toru lotu pocisku oraz efektów zderzenia pocisków z różnymi przegrodami.

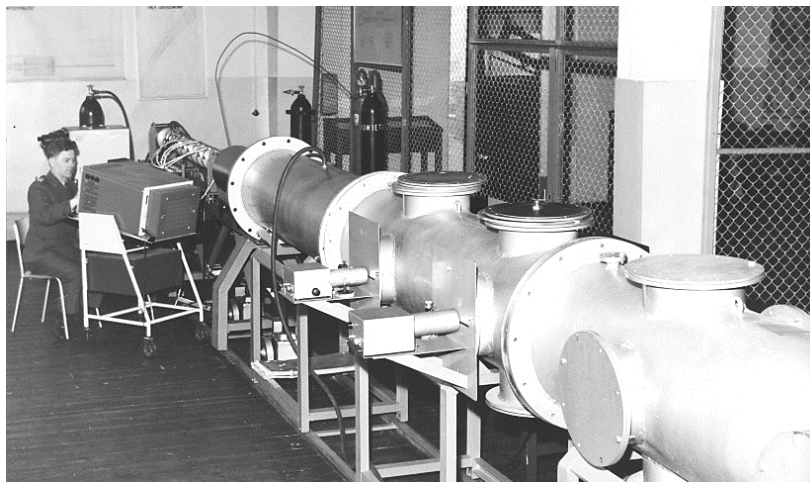
an Jan Czeladzki, M. Sc. (1930 – 1992). He had a post at the Chair of General Armament in the Electromechanical Faculty of Rocket Weapon Systems at the Military University of Technology (MUT) (now the Section of Munitions in the Institute of Armament Technology at the Faculty of Mechatronics, Armament and Aviation of MUT). In the frame of his doctoral dissertation (Czeladzki, 1974) (professor conferring a degree: assistant professor Wiktor Jungowski) he developed and carried out the modelled (theoretical) studies on the double-stage propulsion system, and next a series of experiments to get original results. On the basis of them he indicated among others directions of further work aimed to increase the velocities of projectiles up to 6000 m/s, and even to 10000 m/s after the upgrading of the combustion chamber and application of pistons with a higher resistance, and powders with high energetic performance. The first initial results of his tests were presented in December, 1973. (Czeladzki, 1973).

Testing setup, built by Lt. Col. Marian Czeladzki, M. Sc., is presented in Fig. 9 and 10. It contains three main subunits: (1) double-stage propulsion system using lighter-than-air gas for firing projectiles with the mass from 0.1 to 5.0 g at velocities within 2000 to 6000 m/s; (2) checking-measurement instruments used for identification of projectile and piston velocities, and gas pressure in selected points of the propulsion system; (3) a frame of ballistic track consisting of a foundation of the propulsion system and a catcher of projectiles which was also used to observe the projectile's path and effects of projectiles impacts into different targets.



Rys. 9. Główne elementy stanowiska badawczego z hiperdźwiękowym dwustopniowym układem miotającym zbudowanym w WAT w 1970 r.: 1 – komora prochowa, 2 – rama toru balistycznego, 3 – komora sprężania, 4 – łącznik komory sprężania z komorą wysokiego ciśnienia, 5 – komora wysokiego ciśnienia, 6 – lufa, 7 – kulochwyt, 8 – aparatura kontrolno-pomiarowa (widok od strony komory spalania) (fot. archiwum Instytutu Techniki Uzbrojenia WML WAT)

Fig. 9. Main components of testing setup for hypersonic double-stage propulsion system built in MUT in 1970 r.: 1 – powder chamber, 2 – frame of ballistic path, 3 – compression chamber, 4 – joining section between the compression chamber and the high pressure chamber, 5 – high pressure chamber, 6 – barrel, 7 – bullet catcher, 8 – checking-measurement equipment (view from the side of combustion chamber) (photo – archives of MUT’s Institute of Armament Technology)



Rys. 10. Pplk mgr inż. Marian Jan Czeladzki przygotowujący testy na odporność balistyczną osłon z wykorzystaniem dwustopniowego układu miotającego (widok od strony kulochwytu) (fot. archiwum Instytutu Techniki Uzbrojenia WML WAT)

Fig. 10. Lt. Col. Marian Jan Czeladzki, M. Sc. preparing tests over ballistic resistance of shields with the use of the double-stage propulsion system (view from the side of the bullet catcher) (photo – archives of MUT’s Institute of Armament Technology)

Z kolei dwustopniowy układ miotający zawierał m.in: komorę prochową o średnicy wewnętrznej 40 mm i długości 190 mm; komorę sprężania o średnicy wewnętrznej

The double-stage propulsion system included among others: the powder chamber with internal diameter of 40 mm and length 190 mm; compression chamber with internal

40 mm i długości 2440 mm; łącznik komory sprężania z komorą wysokiego ciśnienia z przewodem o średnicy 40 mm i długości 144 mm; komorę wysokiego ciśnienia w postaci czterowarstwowej rury grubościenniej o średnicy wewnętrznej 40 mm i długości efektywnej 369 mm (całkowita długość komory 500 mm); stożkowy łącznik pomiędzy przewodem komory sprężania, a przewodem lufy; lufę z gładkim przewodem o kalibrze 6,5 mm i długości 1465 mm. Łączna długość całego układu sprężania gazu lekkiego wraz z lufą wynosiła 4445 mm. Ponadto, hiperdźwiękowy układ miotający wyposażono m.in. w: urządzenie zapłonowe (korek gwintowany z elektrodą) służące do zainicjowania spalania się ładunku prochowego; urządzenie zaworowe służące do napełniania komory sprężania gazem lekkim; jarzmo z czujnikami zwarciovymi umożliwiającymi rejestrowanie chwili przejścia tłoka lub fali uderzeniowej, tuleje łączące i uszczelniające poszczególne części układu sprężania.

Do napędzania tłoka poliamidowego (o masach – 40-120 g) używano prochu karabinowego o maksymalnej naważce 100 g. Ciśnienia gazów prochowych powstałych w wyniku spalania prochu osiągało wartość około 393 MPa. W zależności od masy tłoka i masy naważki prochowej osiągnano prędkości tłoka w zakresie od 500 do 1700 m/s, co pozwalało na sprężenie gazu lekkiego do ciśnienia około 1470 MPa. Za pomocą wyżej przedstawionego układu miotającego wykonano ponad 1000 strzałów, osiągając maksymalną prędkość pocisku o masie 0,5 g wynoszącą ok. 4500 m/s.

5. Rozwiązanie konstrukcyjne wspólnie budowanego dwustopniowego układu miotającego

Niestety, prace badawcze, w których wykorzystywano stanowisko laboratoryjne z ukła-

diameter of 40 mm and length 2440 mm; joining fitting of the compression chamber and the high pressure chamber with the duct of 40 mm diameter and 144 mm length; the high pressure chamber in the form of a fourth-layer thick wall tube with internal diameter of 40 mm and effective length 369 mm (overall length of the chamber 500 mm); conical joining section between the duct of the compressing chamber and the bore of barrel; smoothbore barrel of 6.5 mm calibre and 1465 mm length. Total length of the whole system compressing the lighter-than-air gas together with the barrel was equal to 4445 mm. Moreover, the hypersonic propulsion system was equipped among others with: ignition device (a threaded plug with an electrode) used to initiate the burning of the powder charge; the valve device used for filling the compression chamber by the lighter-than-air gas; fixing fitting with short-circuiting sensors for recording the time moment of passing of the piston or the blasting wave, the sleeves connecting and tightening particular parts of compression system.

The polyamide piston (with the mass of – 40-120 g) was propelled by rifle powder with the maximal portion of 100 g. The values of pressure of powder gases produced in effect of powder combustion reached ca. 393 MPa. Depending on piston masses and the mass of powder portion the velocities of piston ranged within 500 to 1700 m/s, what provided compression of the lighter-than-air gas to pressure of ca. 1470 MPa. More than 1000 shots were fired by using the above propulsion system and the maximal velocity of ca. 4500 m/s was reached for projectile with the mass 0.5 g.

5. Present Designing Solution of Double-stage Propulsion System

Unfortunately, the researching work with the use of the laboratory setup developed by Lt. Col. Marian Czeladzki were

dem miotającym opracowanym przez ppłk. Mariana Czeladzkiego, zakończyły się w latach 80-tych XX wieku. Od tego czasu stanowisko było sukcesywnie demontowane, w wyniku czego nie zachowało się (nawet we fragmentach) do naszych czasów. Następujący, jednakże w ostatnich latach rozwój potencjału eksperymentalnego Instytutu Techniki Uzbrojenia WML WAT, wynikający z rosnących potrzeb badawczych, zainspirował do kontynuowania tradycji badawczych zapoczątkowanych przez ppłk. Mariana Czeladzkiego. Dlatego, w ścisłej współpracy z inżynierami-konstruktorami z HSW S.A. ze Stalowej Woli (w tym m.in. Jerzym Kuterem i Radosławem Zarzecznym), zespół Instytutu (w składzie: płk dr inż. Mirosław Zahor, ppłk dr inż. Zbigniew Surma, dr inż. Marcin Sarzyński, dr inż. Michał Grażka i autorzy niniejszego artykułu) zaprojektował dwustopniowy układ miotający, którego rozwiązanie konstrukcyjne uwzględnia zarówno ograniczenia instytutowej bazy laboratoryjnej, jak i możliwości technologiczne Spółki HSW. Przedstawiona na rys. 11 konstrukcja jest końcowym efektem prac analitycznych i konstruktorskich powyższego zespołu.

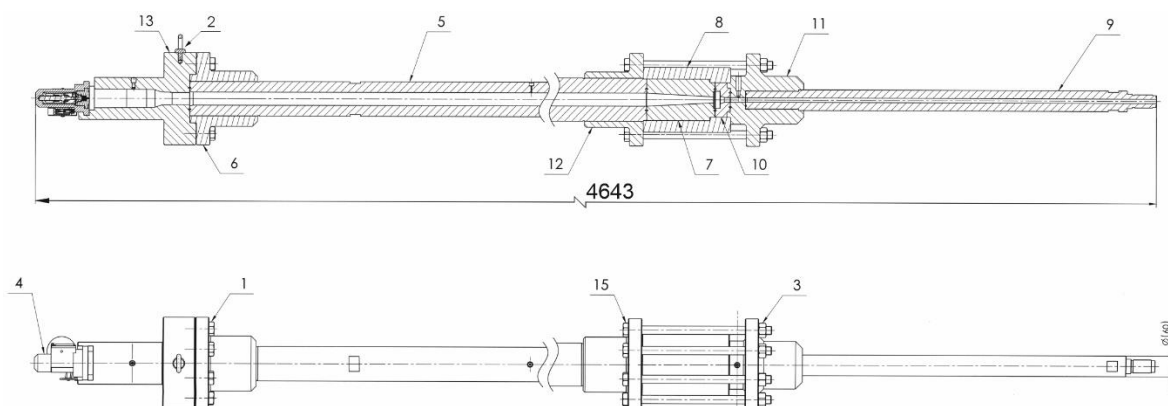
Opracowana konstrukcja to klasyczny gazowy układ dwustopniowy, w którym sprężanie gazu lekkiego odbywa się w wyniku przemieszczania się tłoka (nie ma go na rys. 11), napędzanego ciśnieniem gazów prochowych. Podstawowe dane charakteryzujące układ miotających to: długość komory sprężania – 2700 mm, stosunek średnicy wewnętrznej komory sprężania (38 mm) do średnicy przewodu lufy (12,7 mm) – ≈ 3 ; długość całkowita z jedną sekcją przewodu lufy – 4643 mm. Ze względu na ograniczenia technologiczne, lufę zaprojektowano jak trójdzielny element o łącznej długości 3300 mm. Ponadto, w celu zapewnienia łatwego montażu i demontażu poszczególnych sekcji układu miotającego zaprojektowano połączenia gwintowe/śrubowe, które będą zabez-

terminated in the 80-ties of the 20th century. From that time the setup was successfully disassembled and as a result of it nothing (any part of it) was left to present times. Nevertheless, a process of development of experimental capacities of the Institute of Armament Technology at MUT has been observed in recent years as the result of increased demand for testing and inspirations to continue testing tradition initiated by Lt. Col. Marian Czeladzki. For this reason the team from the Institute (Col. Mirosław Zahor, D. Sc., Lt. Col. Zbigniew Surma, D. Sc., Marcin Sarzyński, D. Sc., Michał Grażka, D. Sc. and authors of present paper) in close cooperation with engineers and designers from HSW S.A. in Stalowa Wola (Jerzy Kuter and Radosław Zarzeczny among others) designed a double-stage propulsion system which takes into account both the limitations of Institute's laboratory base and technological capabilities of public company HSW. Design shown in Fig. 11 is a final effect of analytical and designing work of the team mentioned above.

The developed design is a classical gaseous double-stage system where the compression of the lighter-than-air gas is carried out in effect of piston displacement (it is not shown in Fig. 11) propelled by the pressure of powder gases. There are following main specifications of the propulsion system: length of the compression chamber – 2700 mm, relation of the internal diameter of the compression chamber (38 mm) to diameter of the barrel bore (12.7 mm) – ≈ 3 ; overall length with one section of the barrel bore – 4643 mm. Due to the technological limitations the barrel was designed as a triple part component with overall length 3300 mm. Moreover, the bolt threaded joints were designed to facilitate the assembling and disassembling of particular sections of the pro-

pieczone samouszczelniającymi się oringami wykonanymi z miedzi lub miękkiej stali.

pulsion systems secured by self-tightening rings made from copper or soft steel.



Rys. 11. Rozwiązanie konstrukcyjne dwustopniowego układu miotającego: 1 – śruba z gwintem M24, 2 – śruba z uchem M12, 3 – nakrętka M24, 4 – zamek z urządzeniem spustowym, 5 – komora sprężania, 6 – kołnierz komory prochowej/sprężania, 7 – stożek ciśnieniowy, 8 – tuleja stożka ciśnieniowego, 9 – lufa kalibru 12,7 mm, 10 – zacisk membrany, 11 – kołnierz lufy, 12 – komora prochowa, 13 – sworzeń, 14 – śruba z gwintem M24x420 (opracował Radosław Zarzycki)

Fig. 11. Designing solution of double-stage propulsion system: 1 – Bolt with thread M24, 2 – Wing bolt M12, 3 – Nut M24, 4 – Bolt with triggering system, 5 – Compression chamber, 6 – Flange of powder/compression chamber, 7 – Pressure cone, 8 – Sleeve of pressure cone, 9 – 12.7 mm calibre barrel, 10 – Clamp of membrane, 11 – Flange of barrel, 12 – Powder chamber, 13 – Pin, 14 – Bolt with thread M24x420 (prepared by Radosław Zarzycki)

Na szczególną uwagę zasługuje rozwiązanie konstrukcyjne komory prochowej. Przewiduje ono bowiem wykorzystanie łuski naboju 35 mm jako wymiennego elementu do elaboracji prochu i jego zapłonu, jak również gwarantującego uszczelnienie przestrzeni, w której będzie następować spalanie prochu. Przyjęcie powyższej koncepcji wymusiło zastosowanie zamka komory prochowej wraz z mechanizmem uderzeniowym. Zespół konstrukcyjny skorzystał z oryginalnego rozwiązania opracowanego przez Spółkę HSW, które jedynie przystosowano do wymiarów zaprojektowanej komory prochowej. Jest to proste i skuteczne rozwiązanie, umożliwiające w łatwy sposób zaryglowanie komory prochowej poprzez boczne nasunięcie zamka wraz z mechanizmem uderzeniowym na tylną część komory prochowej, posiadającą wyfrezowania prowadzące pod tzw. rygle. Mechanizm uderzeniowy to z kolei typowy iglicowy układ zbijający

Design of the powder chamber deserves a special attention. The use of 35 mm cartridge case is predicted here as an exchangeable component for accepting the powder and its ignition, and also tightening the space where the powder is burnt. Selection of such conception enforced the application of the powder chamber bolt together with the striking mechanism. The designing team employed an original solution developed by the public company HSW which was only tailored to dimensions of the designed powder chamber. It is a simple and efficient solution facilitating the blocking of the powder chamber by lateral shifting of the bolt with the striking mechanism into the rear part of the powder chamber with milled grooves for the so called locking bolts. The striking mechanism is a typical system with striking pin and self-releasing tightener.

The high pressure chamber was de-

z napinaczem samozwalniającym.

Komorę wysokiego ciśnienia zaprojektowano w postaci dwuwarstwowej rury grubościenniej z wewnętrzną tuleją stożkową, która z układem mocowania membrany stanowi łącznik pomiędzy przewodem komory sprężania, a przewodem lufy. Całkowita długość komory wysokiego ciśnienia wynosi 256 mm.

Na potrzeby kontrolno-pomiarowe przewidziano przyłącza wysokociśnieniowe w dwóch wybranych punktach układu miotającego, tj.: przyłączy nr 1 – w komorze prochowej z gniazdem gwintowanym do wkręcenia czujnika ciśnienia o zakresie przynajmniej do 500 MPa oraz przyłączy nr 2 – w komorze sprężania z gniazdem gwintowanym pod czujnik ciśnienia o zakresie do 2 GPa, umożliwiające pomiar ciśnienia helu w przestrzeni przed stożkiem komory ultrawysokiego ciśnienia.

Oprócz ww. przyłączy kontrolno-pomiarowych przewidziano gniazdo gwintowane pod przyłączy instalacji gazowej/próżniowej zapewniającej, po pierwsze – usunięcie powietrza z komory sprężania, a po drugie – dostarczenie do wnętrza komory sprężania sprężonego helu.

Opracowano także podstawę/ramę toru balistycznego. Na rys. 12 przedstawiono wizualizację podstawy z zamontowanym układem miotającym.

Konstrukcja ramy bazuje na wysoko wytrzymałych profilach aluminiowych oraz komercyjnych systemach prowadnic liniowych. Te ostatnie zostały zastosowane w celu łatwego przemieszczania wzdłużnego i boczno komory prochowej oraz komory sprężania. Ponadto, prowadnicę liniową wykorzystano w tzw. układzie suwnicowym, który został zaprojektowany w celu podtrzymywania i przemieszczania komory wysokiego ciśnienia podczas jej montażu i demontażu po wykonaniu testu strzelaniem.

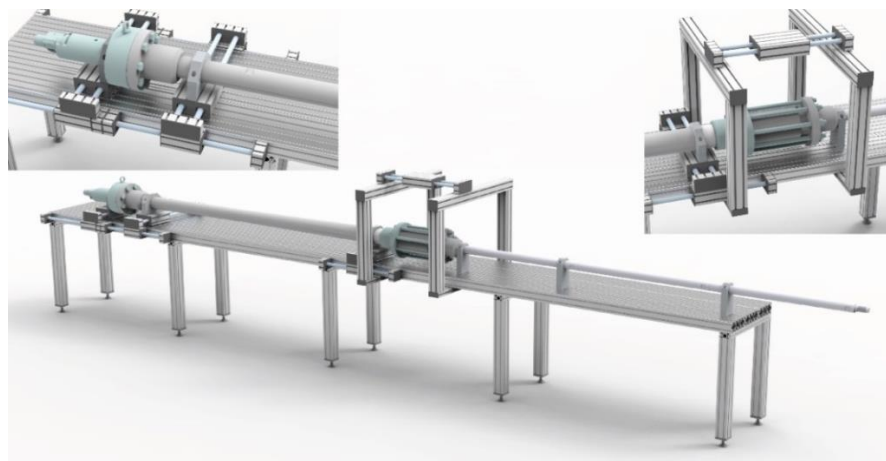
signed in the form of a double-layer thick-wall tube with internal conical sleeve which together with the membrane fixing creates a transition joining between the duct of the combustion chamber and the barrel bore. Overall length of the high pressure chamber is 256 mm.

High-pressure connectors were designed in two selected points of the propulsion system for checking and measurement, i.e.: connector nr 1 – in the powder chamber with a threaded hole for screwing a sensor of pressure having the range at least up to 500 MPa, and connector nr 2 – in the compression chamber with threaded hole for pressure sensor in the range to 2 GPa to measure helium pressure in the space before the cone of the ultrahigh pressure chamber.

Apart of the above mentioned checking-measurement connectors, a threaded hole was predicted for connecting fitting of the gas/vacuum system to secure first of all the removal of the air from the compression chamber, and secondly the supply of compressed helium into the compression chamber.

The foundation/frame of the ballistic track was also developed. Visualisation of the foundation with integrated propulsion system is shown in Fig. 12.

Structure of the frame is based on high strength aluminium profiles and in commercial systems of linear guides. These last ones were employed to facilitate lateral and longitude displacements of powder and compression chambers. Moreover, the linear guide was used in the so called travelling crane arrangement designed for supporting and displacement of the high pressure chamber during its assembling and disassembling after execution of a firing test.



Rys. 12. Wizualizacja graficzna dwustopniowego układu miotającego zamocowanego na ramie toru balistycznego

Fig. 12. Graphical visualisation of the double-single propulsion system integrated into the frame of ballistic track

W chwili opracowywania niniejszego artykułu, opisane wyżej stanowisko badawcze zawierające opracowany dwustopniowy układ miotający jest w fazie montażu i końcowej kompletacji części składowych. W następnym etapie stanowisko zostanie zdemontowane i przetransportowane do miejsca docelowej instalacji. Widok stanowiska badawczego po wstępnym montażu dwustopniowego układu miotającego przedstawiono na rys. 13.

Presented experimental setup of the double-stage propulsion system is now in the phase of assembling and final integration of components. In the next phase the setup will be taken apart and transported to the site of final destination. The view of the experimental setup after initial integration of the double-stage propulsion system is presented in Fig. 13.



Rys. 13. Widok stanowiska dwustopniowego układu miotającego po montażu wstępnym

Fig. 13. View of the double-stage propulsion system after initial integration

Komora sprężania – *Compression chamber*

Komora prochowa – *Powder chamber*
Komora wysokiego ciśn. – *High pres. chamber*

12,7 mm lufa dzielona – *12.7 mm divided barrel*

6. Podsumowanie

1. Układy miotające obiekty z hiperdźwiękowymi prędkościami są zlokalizowane w czołowych laboratoriach na świecie, zajmujących się problematyką mechaniki zderzeń obiektów poruszających się z bardzo dużymi prędkościami. W dostępnej literaturze przedmiotu można znaleźć przykłady tego typu układów, rozwijanych już od lat 50-tych XX wieku, oraz wyniki prowadzonych badań, które jednak mają najczęściej charakter pogładowy i fragmentaryczny.
2. Pierwsze, polskie, stanowisko laboratoryjne z hiperdźwiękowym układem miotającym powstało w latach 70-tych XX wieku w WAT i umożliwiała wystrzeliwanie pocisków o masie od 0,1 do 5,0 g z prędkością od 2000 do 6000 m/s. Jednak, ze względu na brak zamówień – w latach 80-tych i 90-tych XX wieku – na wyniki badań z tego obszaru, zostało zdemontowane i do dnia dzisiejszego nie zachowało się nawet w szczątkowej postaci.
3. Potrzeba prowadzenia w WAT badań teoretycznych i eksperymentalnych nad zjawiskami zachodzącymi przy dużych prędkościach zderzenia spowodowała zaprojektowanie i wykonanie w WAT – przy bardzo dużym wsparciu HSW S.A. – unikatowego w skali kraju laboratoryjnego stanowiska badawczego z układem miotającym pociski z prędkościami hiperdźwiękowymi. Stanowisko to będzie cennym narzędziem badawczym, które będzie wykorzystane w pracach badawczych związanych z techniką wojskową (np. hiperdźwiękowe pociski artyleryjskie, osłony balistyczne sprzętu wojskowego i ludzi) i techniką kosmiczną (np. osłony balistyczne satelitów, badania uderzeniowego oddziaływania mikrometeoroidów itp.).
4. Obecnie trwają intensywne prace nad mon-

6. Summary

1. Systems propelling the objects with hypersonic velocities are used worldwide by leading laboratories dealing with questions of impact mechanics of objects moving with very high velocities. The available literature includes some examples of this type of systems which have been developed since the 50-ties of the 20th century, but the results of researches usually have a conceptual and fragmentary character.
2. First Polish laboratory setup with the hypersonic propulsion system was built in the 70-ties of the 20th century in MUT and provided firing of projectiles with the mass between 0.1 to 5.0 g at velocities from 2000 to 6000 m/s. But, because of a lacking demand – in the 80-ties and 90-ties of the 20-th century – for the results of test in this domain it was taken apart and now anything was left of it even in a residual form.
3. The original laboratory experimental setup with the system propelling projectiles to hypersonic velocities was designed and manufactured in MUT at great support of HSW S.A. to carry out theoretical researches and experimental tests in the MUT over the effects occurring at high velocity impacts. The setup will be a precious tool of research used in projects connected with military technique (e.g. hypersonic artillery projectiles, ballistic shields of military equipment and personnel) and space technology (e.g. ballistic shields of satellites, testing the impact effects of micrometeorites, etc.).
4. Currently, the intense work is carried out on initial assembling and final completeness of components of the la-

tażem wstępnym oraz końcową kompletacją części składowych stanowiska laboratoryjnego z hiperdźwiękowym układem miotającym. W kolejnym etapie planowany jest demontaż stanowiska i jego przetransportowanie do miejsca docelowej instalacji, a następnie jego uruchomienie i przeprowadzenie testów sprawdzających, mających na celu sprawdzenie poprawności działania układu.

boratory setup with hypersonic propulsion system. In the next phase a disassembling of the setup is planned to transport it to the site of final destination where it has to be put in operational state to carry out checking tests confirming the correct operation of the system.

Podziękowania

Serdecznie dziękujemy Prezesowi HSW S.A. Panu Bartłomiejowi Zajęcowi oraz specjalistom HSW S.A. za profesjonalizm, duże zaangażowanie oraz wysoką jakość wykonania wszystkich elementów składowych krytycznych elementów badawczego układu miotającego.

Acknowledgments

We would like to express cordial thanks to Mr Bartłomiej Zajęc, the Management Director of the Stalowa Wola Steel Works Public Company (HSW S.A.) and to Specialists of HSW S.A. for professionalism and engagement and high workmanship level in manufacture of all critical components of the experimental propulsion system.

Praca została sfinansowana przez Wojskową Akademię Techniczną w ramach projektu UGB 777/2020/WAT

This work was financed by Military University of Technology under research project UGB 777/2020/WAT

Literatura / Literature

- Adams, M., Barth, E.J. (2008). *Dynamic Modelling and Design of a Bulk-Loaded Liquid Monopropellant Powered Rifle*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 130.
- Badgular, D.M., Talawar, M.B., Asthana, S.N., Mahulikar P.P. (2008). *Advances in science and technology of modern energetic materials: An overview*. Journal of Hazardous Materials, 151, s. 289-305.
- Ciepliński, A., Torecki, S., Woźniak, R. (1993). *Przyszłość broni miotającej*, Przegląd Techniczny, nr 32-33.
- Ciepliński, A., Woźniak, R. (1995), *Encyklopedia współczesnej broni palnej*, Wydawnictwo WiS, Warszawa.
- Czeladzki, M.J. (1973). *Wstępne wyniki badań dwustopniowej armatki hiperdźwiękowej*, Materiały III Konferencji Instytutów Wydziału Elektro-mechanicznego Uzbrojenia, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- Czeladzki, M.J. (1974). *Modelowe badania balistyczne hiperdźwiękowych układów miotających*, roz-

- prawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- Darling, D. *SHARP (Super High Altitude Research Project)*, Pobranie 27.09.2022, <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/SHARP.html>
- Fedyna, K., R. Woźniak, R. (1995). *Badania balistyczne układu miotającego na paliwo ciekłe (rozprawa doktorska)*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), Pobranie 27.09.2022, <https://www.isl.eu/en/test-facilities/ballistics>.
- Janiszewski, J., Woźniak, R. (2015). *Analiza stanu techniki w dziedzinie elektromagnetycznego miotania pocisków*. Problemy Techniki Uzbrojenia, 44(135), s. 7-31.
- Janzon, B., Backofen Jr., J., Brown, R.E., Cayzac, R., Diederer, A., Giraud, M., Held, M., Horst, A.W., Thoma K., (2007). *The Future of Warheads, Armour and Ballistics*, 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain s. 16-20.
- Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Pobranie 27.09.2022, www.llnl.gov/news/100th-shot-llnls-gun-desert.
- Leciejewski, Z.K., Cudziło S. (2011). *Kierunki rozwojowe miotających materiałów wybuchowych w aspekcie wymagań przyszłościowej broni palnej*, Materiały Wysokoenergetyczne, T. 3, s. 64-71.
- Lexow, B., Wickert, M., Thoma, K., Schäfer, F., Poelchau, M.H. and Kenkmann, T. (2013), *The extra-large light-gas gun of the Fraunhofer EMI: Applications for impact cratering research*. Meteoritics & Planetary Science, 48: s. 3-7.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), Pobranie 27.09.2022, <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/horizontallaunch.html>,
- Rosenberg, Z., Dekel, E. (2016). *Terminal Ballistics*, Springer Science+Business Media Singapore.
- Sharoni, H.A., Bacon, L.D. (1997). *The Future Combat System (FCS): Technology Evolution and Feasibility Assessment*, Armor, str. 29-34.
- Su-Jeong Lee, Ji-Hun Kim, Bong Sob Song, and Jin Ho Kim, (2013). *Coil Gun Electromagnetic Launcher (EML) System with Multi-stage Electromagnetic Coils*, Journal of Magnetism 18(4), s. 481-486.
- Walters, W.P., Zukas, J.A. (1989). *Fundamentals of shaped charges*, John Wiley and Sons, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore.
- Witkowski, I. (1999). *Supertajne projekty Hitlera cz.1, Wis-2 IGOR* Witkowski.
- Woźniak, R., Fedyna, K., (1995). *Badania balistyczne układu miotającego na paliwo ciekłe*, Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa.
- Zahn, B.R. (2015). *The Future Combat System: Minimizing Risk While Maximizing Capability*, 2000 http://web.mit.edu/ssp/publications/working_papers/wp-00-2.pdf.
- Zukas, J.A. (1990). *High velocity impact dynamics*, Wiley-Interscience, New York.

