



METODY POMIARU MAKSYMALNEGO CIŚNIENIA GAZÓW PROCHOWYCH STOSOWANE PODCZAS STRZELANIA ZE STANOWISKA WYPOSAŻONEGO W 120 MM ARMATĘ CZOŁGU LEOPARD 2A4

POWDER GASES MAXIMAL PRESSURE MEASUREMENT METHODS USED AT FIRING ON TESTING STAND FOR LEOPARD 2A4 TANK 120 MM GUN

Piotr BIENIEK, Janusz WEISS

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyński St., 05-220 Zielonka, Poland
Author's e-mail address: bieniekp@witu.mil.pl; ORCID: 0000-0002-0591-2231

DOI 10.5604/01.3001.0013.3775

Streszczenie: Artykuł przybliży zagadnienie pomiaru maksymalnego ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy na stanowisku pomiarowym wyposażonym w 120 mm armatę L44 czołgu Leopard 2A4. W przypadku stanowiska, w odróżnieniu od czołgu, można zastosować jednoczesny pomiar dwiema niezależnymi od siebie metodami. Celem artykułu jest porównanie metod pomiaru, z których pierwsza opiera się na umieszczeniu przyrządów zgniotowych bezpośrednio wewnątrz badanego naboju, natomiast druga na montażu czujnika piezoelektrycznego w specjalnie wykonanym gnieździe w komorze naboju armaty. Opisano czynności wcześniejszego przygotowania aparatury badawczej oraz postępowanie pozwalające na zachowanie stałego nadzoru nad jej stanem technicznym, z którymi wiąże się dokładność pomiaru ciśnienia maksymalnego gazów prochowych. Przedstawione zbiorcze wyniki badań 120 mm amunicji służą do porównania stosowanych metod (między innymi) pod względem powtarzalności otrzymywanych wyników, niezawodności aparatury pomiarowej oraz czasu potrzebnego na jej przygotowanie i dokonanie pomiaru na stanowisku ogniowym. Wybranie do stosowania tylko jednej z opisanych metod może okazać się trudne ze względu na wpływ wielu czynników występujących podczas pomiaru maksymalnego ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy.

Słowa kluczowe: pomiar ciśnienia, parametry balistyczne, stanowisko Leopard.

Abstract: The paper describes a question of measuring the maximum pressure of powder gases in the barrel of 120 mm L44 Leopard 2A4 tank gun placed in the testing position which, in opposite to the tank, deploys two independent methods of simultaneous measurement. The paper compares the measurement methods, the first based on placement of crushing devices directly inside the tested cartridge, and the second on deployment of a piezoelectric sensor assembled into a specially made seat in the gun's cartridge chamber. Preparation of testing equipment and permanent monitoring of its technical condition to secure the accuracy of measurement of maximum pressure for powder gases is described. Aggregated test results of 120 mm ammunition are used to compare the deployed methods regarding (among others) the repeatability of results, reliability of the measuring equipment, and the time needed to its preparation and to the measurement at the gun site. Any recommendation of only one from described methods for the application may be difficult as there are many factors affecting the measurement of the maximal pressure of powder gases in the barrel bore.

Keywords: pressure measurement, ballistic parameters, gun site "Leopard".

1. Charakterystyka stanowiska wyposażonego w 120 mm armatę Leopard

Będące w wyposażeniu Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia stanowisko Leopard ze 120 mm armatą gładkolufową Rheinmetall Rh L44 pozwala na prowadzenie badań 120 mm amunicji czołgowej i jej elementów w warunkach odpowiadających strzelaniu z czołgu Leopard 2A4. Stanowisko składa się z dwóch zasadniczych zespołów - ze 120 mm armaty i z konstrukcji metalowej łączącej armatę z podstawą i umożliwiającą jej transport i montaż ze stendem. Zasadniczym zespołem armaty czołgu Leopard jest 120 mm lufa posiadająca w tylnej części (w komorze nabojojowej) gniazdo do montażu czujnika piezoelektrycznego, umożliwiające pomiar ciśnienia maksymalnego. Do tylnej części lufy zamocowana jest nasada zamkowa i przesuwający się wewnątrz niej klin zamkowy. Dodatkowo lufa obudowana jest osłoną termiczną, umożliwiającą wyrównanie temperatury na jej zewnętrznej powierzchni, a także jest wyposażona w przedmuchiawcz gazów prochowych. Lufa z zespołem odrzutowym przemieszczają się po powierzchniach ślizgowych prowadnic kołyski za pośrednictwem zespołu oporopowrotnego. Armata posiada również wskaźnik odrzutu zamontowany na osłonie nasady zamkowej, mechanizm podniesieniowy oraz urządzenie odpalające (Pankowski, 1987).

1. Specification of 120 mm Leopard Gun Site

The Military Institute of Armament Technology has a testing gun site "Leopard" fitted with 120 mm Rheinmetall Rh L44 smooth bore gun for testing 120 mm tank ammunition and its components in conditions corresponding to firing by Leopard 2A4 tank. The gun site consists of two main units such as 120 mm gun and a metal structure connecting the gun to a mounting and enabling gun's transport and integration on the stand. The main unit of the Leopard tank gun is the 120 mm barrel having a seat in the rear part (cartridge chamber) for integration of a piezoelectric sensor for measurement of the maximal pressure. A breech block with a breech wedge shifting inside it are fixed to the rear part of the barrel. The barrel is additionally fitted with a thermal screen, equalizing temperatures on its external surface, and also with a blower of powder gases. The barrel together with the recoil unit moves on the sliding surfaces of cradle runners with the help of the returning-resisting mechanism. The gun also has a recoil indicator embedded on a cover of the breech block, and a lifting mechanism and a triggering device (Pankowski, 1987).



Fot. 1. Stanowisko Leopard zamocowane na płycie stanowiska ogniowego

Photo 1. "Leopard" stand mounted on a plate of the gun site

W zależności od rodzaju prowadzonych przez Instytut badań oraz typu badanej amunicji strzelanie ze stanowiska Leopard prowadzi się do kulochwytu lub wału ziemnego naturalnego (lub sztucznie usypanego). W przypadku badań naboju z makietami pocisków podkalibrowych, lub naboju z balistycznymi pociskami odłamkowo-burzącymi strzelania prowadzone są na stanowisku ogniowym wyposażonym w kulochwyty. Podczas tych prób możliwe jest dokonanie pomiarów parametrów balistycznych oraz oceny wytrzymałości i funkcjonowania amunicji czołgowej i jej elementów. Badanie 120 mm naboju z pociskami podkalibrowymi bojowymi i ćwiczebnymi oraz odłamkowo-burzącymi odbywa się na poligonowym stanowisku ogniowym z wykorzystaniem nasypu ziemnego, oddalonego o około 1000 m od miejsca zamocowania armaty. Próby poligonowe obejmują możliwości pierwszego stanowiska ogniowego oraz dodatkowo pozwalają na badanie skupienia pocisków na tarczy oraz zdolności przebicia płyty pancernej umieszczonych na tle nasypu ziemnego (MON, 2006).

2. Pomiar ciśnienia metodą zgmiotową

Do pomiaru ciśnienia maksymalnego gazów prochowych w przewodzie lufy stanowiska Leopard stosowane są w przyrządy zgmiotowe o objętości 7 cm^3 wraz z miedzianymi zgmiotkami cylindrycznymi o wymiarach $5 \times 8,1 \text{ mm}$ (zgodnie z normą GOST). Istnieje też możliwość pomiaru ciśnienia przyrządami o objętości $13,7 \text{ cm}^3$ i średnicy tłoczka $3,91 \text{ mm}$ ze zgmiotkami miedzianymi kulowymi o wymiarze 6 mm (zgodnie z normą STANAG 4113).

Przed przystąpieniem do przygotowania przyrządów zgmiotowych obydwu rodzajów należy sprawdzić ich stan techniczny (swobodne przemieszczanie się tłoczka w przyrządzie, brak pęknięć zewnętrznej powierzchni przyrządu, brak uszkodzeń gwintu łączącego nakrętkę z korpusem przyrządu oraz możliwość całkowitego zmontowania przyrządu).

Przygotowanie przyrządów zgmiotowych o objętości 7 cm^3 należy rozpocząć od przeprowadzenia na prasie Baranowskiego dwóch wstępnych obciszków miedzianych zgmiotków

Depending on the type of tests and ammunition the firing at the gun site "Leopard" is carried out towards a bullet trap or a natural (or piled up artificially) ground embankment. In the case when the ammunition with the mock-up kinetic or HE projectiles is fired the tests are carried out in the gun site with the bullet trap. At these trials the ballistic parameters and the strength and functionality of tank ammunition and its components can be determined. Tests of 120 mm ammunition with live and training kinetic and HE projectiles are performed in the range gun site by using the ground embankment placed at ca. 1000 m distance from the gun site. The range trials include the capacities of the first gun site and additionally enable the checking of projectiles concentration on the target and penetrating capacities against an armour plate placed before the embankment (MON, 2006).

2. Measurement of Pressure by Crushing Method

Crushing devices having the volume of 7 cm^3 with the copper crushers having the size of $5 \times 8.1 \text{ mm}$ (according to GOST standard) were used to measure the maximal pressure of powder gases in the barrel bore of the "Leopard" stand. There is also a possibility for measuring the pressure by the devices with capacity of 13.7 cm^3 and piston diameter 3.91 mm employing spherical copper crushers with 6 mm size (acc. to STANAG 4113).

These two crushing devices have to be prepared by checking their technical efficiency (unrestricted movement of the piston, lack of any cracks on the external surface, lack of defects on the thread connecting the nut with the body of the device and possibility for assembling the whole device together).

The crushing devices with volume of 7 cm^3 have to be prepared by two initial cramps of cylindrical copper crushers on

cylicydrycznych. Wielkość siły obcisku zgniotków miedzianych zależy od przewidzianego w dokumentacji technologicznej średniego maksymalnego ciśnienia gazów prochowych dla konkretnego naboju. Ostateczna wartość obcisku powinna być mniejsza o wartość $20 \div 30$ MPa od tej, która znajduje się w dokumentacji. Każdorazowo po wykonaniu obcisku, należy zmierzyć wysokość zgniotka w celu obliczenia jego współczynnika sztywności α .



Podwójnie obciśnięty zgniotek miedziany należy umieścić wewnątrz korpusu przyrządu zgniotowego i zmontować z nakrętką w taki sposób, aby powietrze z wnętrza przyrządu zostało wyparte, a tłoczek ściśle przylegał do czoła zgniotka, co umożliwi uzyskanie dokładniejszego pomiaru. Pustą przestrzeń kanału prowadzącego tłoczek należy wypełnić mastyką (mieszaniną wosku pszczelego i smaru działowego) w celu zabezpieczenia przyrządu przed dostaniem się do jego wnętrza gazów prochowych i osadu (nagaru) będącego produktem spalania ładunków miotających (Instrukcja Nr 5316-62,,B", 1964).

the Baranowski press. The cramping force applied to copper crushers depends on the average maximal pressure of powder gases predicted in technical documentation for the specific cartridge. The final value of the cramping has to be lower by $20 \div 30$ MPa than that given in the documentation. The height of the crusher has to be measured each time after the cramping in order to calculate its coefficient of stiffness α .

Fot. 2. Zgniotek miedziany cylindryczny przed i po obciskaniu

Photo 2. The cylindrical copper crusher before and after cramping

A double cramped copper crusher has to be put into the body of the crushing device and the nut has to be fixed in the way which completely removes the air from the inside and the piston sticks strictly to the head of crusher in order to secure a more accurate measurement. The empty space of the piston leading channel has to be filled with the mastic (mixture of bee wax and gun grease) to prevent the inside of device against a migration of powder gases and solid deposits (carbon deposit) which are the products of the propelling charges combustion (Instrukcja Nr 5316-62,,B", 1964).



Fot. 3. Przyrządy zgniotowe o objętości 7 cm^3 zmontowane i po demontażu
Photo 3. Assembled and disassembled crushing devices of 7 cm^3 capacity

Przygotowanie przyrządów zgniotowych o objętości $13,7 \text{ cm}^3$ i średnicy tłoczka $3,91 \text{ mm}$ nie obejmuje prac na prasie Baranowskiego, ponieważ miedziane zgniotki kulkowe nie wy-

Preparation of crushing devices of 13.7 cm^3 capacity and 3.91 mm piston diameter does not need any use of Baranowski press as the copper spherical

magają wstępnego obcisku. Do miedzianych zgniotków kulkowych producent dołącza tabelę cechowania i pierścienie centrujące.

Tabela cechowania jest zestawieniem wartości ciśnienia maksymalnego w odniesieniu do wysokości zgniotka miedzianego po strzale i jest wykonywana dla konkretnej partii zgniotków oraz temperatury ładunku miotającego.

Pierścień centrujący wykonany z elastycznego materiału jest dodatkowym elementem przyrządu zgniotowego, który zapewnia jednoznaczne położenie miedzianego zgniotka kulowego i zapobiega jego przemieszczaniu wewnątrz przyrządu.

crushers have not to be initially cramped. The manufacturer of the copper spherical crushers attaches a calibrating table and centring rings.

The calibrating table is a collation of maximal pressure values in reference to the height of the crusher after the shot and is performed for a specific lot of crushers and temperature of the propelling charge.

The centring ring is made of an elastic material and creates an additional component of the device securing the fixed position of spherical crusher and preventing its displacement inside the device.



Fot. 4. Zgniotek miedziany kulkowy przed i po strzale, bez i z pierścieniem centrującym
Photo 4. The copper spherical crusher before and after the shot, and without and with the centring ring

Po umieszczeniu w gnieździe korpusu przyrządu zgniotowego pierścienia centrującego i miedzianego zgniotka kulowego, należy przygotować nakrętkę przyrządu zgniotowego. W celu zabezpieczenia wewnętrznej części przyrządu zgniotowego przed erozyjnym działaniem gazów prochowych, należy wypełnić kanał prowadzący tłoczek (od zewnętrznej strony nakrętki) wysokopróżniowym smarem sylikonowym. Następnie umieścić sprężynkę na tłoczku i umieścić w kanale prowadzącym do połowy. Nadmiar smaru wytrzeć, a nakrętkę dokręcić za pomocą klucza dynamometrycznego momentem 5 Nm (*Handing instructions for NATO-Crusher measuring apparatus, 1998*).

W celu przeprowadzenia pomiaru ciśnienia, podczas pojedynczego strzału, należy przygotowane przyrządy zgniotowe w ilości dwóch sztuk (z każdego rodzaju) umieścić na dnie okucia metalowego. Przyrządy powinny być skierowane widoczną stroną otworu kanału prowadzącego tłoczek w kierunku pocisku i zamocowane w taki sposób, aby zapobiec ich przemieszczeniu, bądź niewłaściwemu położeniu podczas transportu naboju na stanowisku ogniowym oraz po jego załadowaniu do komory naboju.

After placing the centring ring and the copper spherical crusher into the seat of the crusher device body the nut of the device has to be prepared. The internal part of the crushing device has to be prevented against the erosive action of powder gases by filling the piston leading channel (from the external side of the nut) with the high-vacuum silicon grease. In the next step the spring has to be placed on the piston and then placed in the half of the leading channel. The excessive grease has to be removed and the nut has to be tightened by a dynamometric wrench with moment of 5 Nm (*Handing instructions for NATO-Crusher measuring apparatus, 1998*).

In order to measure the pressure at a single shot, two crushing devices have to be prepared (of each type) and placed at the base of the metallic ferrule. The visible side of the device leading channel opening has to be oriented towards the projectile and the devices have to be fixed in a way preventing any displacement or wrong orientation of them during the transportation of the cartridge on the gun site and after its loading into the cartridge chamber.



Fot. 5. Przyrządy zgniotowe o objętości $13,7 \text{ cm}^3$ i średnicy tłoczka $3,91 \text{ mm}$ zmontowane i po demontażu

Photo 5. Assembled and disassembled crushing devices of 13.7 cm^3 capacity and 3.91 mm piston diameter

Podczas strzału następuje osiowe odkształcenie plastyczne zgniotka miedzianego umieszczonego wewnątrz przyrządu zgniotowego, które jest proporcjonalne do ciśnienia maksymalnego gazów prochowych w przewodzie lufy.

Po oddaniu strzału odszukuje się przyrządy zgniotowe, które mogą pozostać w lufie armaty, bądź znajdować się w niewielkiej odległości przed lufą. Znalezione przyrządy należy rozmontować, a wysokość zgniotków zmierzyć za pomocą mikrometru lub suwmiarki o dokładności $0,01 \text{ mm}$. Z otrzymanego pomiaru wyliczyć z uwzględnieniem współczynnika sztywności zgniotka (przyrządy zgniotowe o objętości 7 cm^3), lub odczytać z tabeli cechowania (przyrządy zgniotowe o objętości $13,7 \text{ cm}^3$) maksymalne ciśnienie dla każdego przyrządu zgniotowego z osobna. Z uzyskanych dwóch wartości ciśnienia maksymalnego wylicza się średnią arytmetyczną, która jest wynikiem końcowym przeprowadzonego pomiaru (MON, 1992).

3. Pomiar ciśnienia metodą piezoelektryczną

Do pomiaru ciśnienia maksymalnego gazów prochowych w przewodzie lufy na stanowisku balistycznym Leopard stosowane są również czujniki piezoelektryczne firmy Kistler o średnicy $\varphi = 12 \text{ mm}$ wraz z zestawem pomiarowym składającym się ze: wzmacniacza, oscyloskopu, komputera i przewodów sygnałowych.

During the shot the copper crusher placed inside the crushing device is subjected to a plastic axial deformation which is proportional to maximal pressure of gases in the barrel bore.

After delivering the shot the crushing devices have to be found as they remain inside the barrel or in the vicinity of the muzzle. The recovered devices have to be disassembled and the height of the crushers has to be measured by a micrometre or a slide gauge with the accuracy of 0.01 mm . After the measurement the maximal pressure may be calculated independently for each crushing device by using the crusher's stiffness coefficient (crushing devices with capacity of 7 cm^3) or by reading from the calibration table (crushing devices with capacity of 13.7 cm^3). The arithmetic mean is calculated from the two received values of the maximal pressure which stands for the final result of the measurement (MON, 1992).

3. Measurement of Pressure by Piezoelectric Method

The ballistic testing stand "Leopard" also deploys the piezoelectric sensors of Kistler company with diameter of $\varphi = 12 \text{ mm}$ and a measurement set consisting of the amplifier, oscilloscope, computer and measurement leads to measure the maximal pressure of powder gases in the barrel bore.

Przed przystąpieniem do montażu czujnika w gnieździe ścianki komory nabojej armaty należy wykonać szereg zabiegów mających na celu przygotowanie czujnika, zestawu pomiarowego i samego gniazda pod czujnik. Czujnik piezoelektryczny powinno się poddawać systematycznej kalibracji, która zapewnia poprawność pomiarową i wpływa na dokładność otrzymywanych wyników. Pełną gotowość czujnika osiąga się poprzez sprawdzenie jego stanu technicznego i zabezpieczenie przed szkodliwym działaniem gazów prochowych.

A series of activities has to be performed before placing the sensor into the gun cartridge chamber wall seat to prepare the sensor, the measurement set and the sensor's seat. The piezoelectric sensor has to be systematically calibrated to maintain the measurement efficiency and accuracy of results. Complete readiness of the sensor is achieved by examination of its technical status and protection against harmful action of powder gases.



Fot. 6. Czujnik piezoelektryczny przed i po zamocowaniu części ochronnych
Photo 6. Piezoelectric sensor before and after fixing the protective parts

Po przygotowaniu czujnika należy dobrać przewód sygnałowy o długości, zapewniającej bezpieczną odległość od armaty. Następnie przewód poddać oględzinom w celu sprawdzenia stanu technicznego jego izolacji i złączy. Następną czynnością jest połączenie przewodu z czujnikiem, poprzedzone przełożeniem przewodu przez poprzeczny otwór rurkowego klucza nasadowego, który umożliwi zamocowanie czujnika w gnieździe ścianki komory nabojej.

Gniazdo ścianki komory nabojej jest zabezpieczone specjalną zaślepką, którą przed planowanym pomiarem ciśnienia należy wykręcić, a miejsce montażu czujnika poddać przeglądowi. Najważniejszą czynnością podczas przeglądu jest zapewnienie drożności otworu wykonanego w ściance komory nabojej oraz weryfikacja stanu gwintu i czystości powierzchni czołowej i walcowej gniazda.

Po wykonaniu wszystkich czynności przygotowawczych można przystąpić do mon-

After the sensor is prepared a signal wire length has to be selected to secure the safe distance to the gun. Next the cable has to be visually examined to check the state of its insulation and connectors. In the following step the wire is connected to the sensor but previously it is put through the crosswise opening of the cylindrical end of a wrench which will be used to fixing the sensor into the cartridge chamber wall seat.

The cartridge chamber wall seat is protected by a special terminating cap which has to be unscrewed before the planned measurement of the pressure, and the place for fixing the sensor has to be inspected. The most important action during the inspection is to check a passage of a hole made in the cartridge chamber wall, and the thread efficiency, and the cleanness of seat face and cylindrical surfaces.

The assembling of the piezoelectric

tażu czujnika piezoelektrycznego. Dokręcenie czujnika powinno się odbywać za pomocą klucza dynamometrycznego momentem wynoszącym 25 Nm, co zapobiega jego odkręceniu podczas strzelania. Przy rozwijaniu przewodu sygnałowego istotne jest, aby omijał szerokim łukiem oś stanowiska balistycznego od strony zamka, czyli rejon uderzenia okuś wyrzucanych po strzale. Aby umożliwić bezkolizyjne usytuowanie przewodu sygnałowego względem ruchomej nasady należy zastosować jego boczne odprowadzenie, które zostało przedstawione na fotografii nr 7.

sensor can be started after execution of all preparatory activities. The sensor has to be tightened by the dynamometric wrench with the moment of 25 Nm preventing its unscrewing at firing. It is essential at laying the signal cable that it bypasses the axis of the ballistic stand by a safe margin from the breech side i.e. the zone where the after-shot ferrules hit the ground. In order to provide a proper location of the signal cable against the moving block, its lateral connection presented in Photo 7 has to be used.



Fot. 7. Czujnik piezoelektryczny wkręcony w gniazdo ścianki komory naboju od strony nasady z bocznie odprowadzonym przewodem sygnałowym

Photo 7. Piezoelectric sensor screwed into the seat of the cartridge chamber wall from the side of the block with a laterally located wire

Wolny koniec rozwiniętego przewodu sygnałowego podłącza się do urządzenia pomiarowego, z którego odczytywane są zmierzone wartości ciśnienia po jego uprzednim ustawieniu. Do najważniejszych ustawień zalicza się przewidywany zakres mierzonego ciśnienia oraz czułość czujnika piezoelektrycznego, ustalone przez producenta i umieszczone na opakowaniu czujnika (Kistler Group, 2010). Wyzwalanie urządzenia zalecane jest dopiero po załadowaniu naboju i zamknięciu zamka armaty, aby zapobiec przypadkowemu pomiarowi mogącemu wystąpić na skutek przesunięcia klina zamkowego.

Dodatkowo w przypadku pomiaru metodą piezoelektryczną istnieje możliwość uzyskania przebiegu ciśnienia w funkcji czasu. Przykładowy wykres ciśnienia otrzymany w wyniku podłączenia oscyloskopu do urządzenia pomiarowego został przedstawiony na poniższym rysunku.

The second end of the unwound measurement wire is connected to the instrument from which the measured values of pressure are read, prior its earlier pre-setting. The most important settings include the predicted range of the measured pressure and the sensitivity of the piezoelectric sensor given by the manufacturer, printed in the sensor's box (Kistler Group, 2010). It is recommended to trigger the instrument after loading the cartridge and locking the gun breech to prevent any casual measurement caused by the shifting of the breech locking wedge.

Additionally in the case of measurement with the piezoelectric method it is possible to get the course of the pressure as a time function. An exemplary plot of the pressure received by connecting the oscilloscope to the measurement instrument is presented in the figure below.



Rys. 1. Przykładowy wykres przebiegu ciśnienia w funkcji czasu
Fig. 1. Exemplary plot of the pressure versus time

Sterowanie oscyloskopem jest możliwe dzięki oprogramowaniu zainstalowanemu na komputerze i połączeniu urządzeń za pośrednictwem złącza USB. Najistotniejszymi ustawieniami wpływającymi na właściwe działanie oscyloskopu są: dobór przedziału czasowego, czułość wyzwalania oraz wartość napięcia portu łączącego oscyloskop ze wzmacniaczem ładunku (Pico Technology, 2009).

Podczas strzału na skutek obciążenia mechanicznego w czujniku piezoelektrycznym powstaje ładunek elektryczny, który zostaje przesłany do urządzenia pomiarowego, gdzie następuje przetworzenie otrzymanego sygnału na wielkości liczbowe oraz do oscyloskopu, gdzie następuje graficzne przedstawienie mierzonego ciśnienia.

4. Wyniki

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiaru ciśnienia maksymalnego w przewodzie lufy stanowiska Leopard przeprowadzone równoległe metodą zgniotową oraz piezoelektryczną podczas strzelania 120 mm nabojami z różnymi rodzajami pocisków, termostатовanymi w temperaturze normalnej. Przedstawione wyniki uwzględniają poprawki balistyczne na objętość przyrządów zgniotowych umieszczonych wewnątrz naboju.

The oscilloscope may be controlled by a computer code installed in the computer and due to connection of the instruments via USB. There are following most essential settings affecting the operation of the oscilloscope: selection of time interval, sensitivity of triggering, and value of voltage for the connecting port between the oscilloscope and the electric charge amplifier (Pico Technology, 2009).

In the piezoelectric sensor an electric charge generated by a mechanical impact at firing is sent to the measurement instrument, where it is next converted into numerical values, and to the oscilloscope where the measured pressure is shown in a graphical form.

4. Results

Table 1 compares the results of maximal pressure measurements received for the barrel bore on the "Leopard" stand by both the crushing and piezoelectric methods at firing 120 mm cartridges with different types of projectiles conditioned at the ambient temperature. Presented results take into account the capacities of crushing devices placed inside the cartridges.

Tabela 1. Wyniki pomiaru ciśnienia maksymalnego w przewodzie lufy stanowiska Leopard
 Table 1. Measurements results for maximal pressure inside the barrel bore on „Leopard” stand

Rodzaj pocisku Type of projectile	$P_{m\acute{s}r\ 7cm^3}$ [MPa]	$\Delta P_{max\ 7cm^3}$ [%]	$P_{m\acute{s}r\ 13,7cm^3}$ [MPa]	$\Delta P_{max\ 13,7cm^3}$ [%]	$P_{m\acute{s}r\ cp}$ [MPa]	$\Delta P_{max\ cp}$ [%]
APFSDS-T	438,9	+ 0,8	464,2	+ 1,8	517,6	+ 1,4
APFSDS-T-TP	374,8	-1,7	399,6	+ 1,3	450,8	+ 0,8
HE	371,1	+ 0,3	405,6	- 0,9	454,5	+1,2
Makieta* Mock-up*	506,7	- 1,3	577,7	- 3,6	674,8	+ 3,3

$P_{m\acute{s}r\ 7cm^3}$ - średnie ciśnienie maksymalne mierzone przyrządami zgniotowymi o objętości $7\ cm^3$ uzyskane z serii 5 strzałów,

$\Delta P_{max\ 7cm^3}$ - największe odchylenie ciśnienia mierzonego przyrządami zgniotowymi o objętości $7\ cm^3$ dla pojedynczego strzału w stosunku do ciśnienia średniego uzyskanego z serii 5 strzałów,

$P_{m\acute{s}r\ 13,7cm^3}$ - średnie ciśnienie maksymalne mierzone przyrządami zgniotowymi o objętości $13,7\ cm^3$ uzyskane z serii 5 strzałów,

$\Delta P_{max\ 13,7cm^3}$ - największe odchylenie ciśnienia mierzonego przyrządami zgniotowymi o objętości $13,7\ cm^3$ dla pojedynczego strzału w stosunku do ciśnienia średniego uzyskanego z serii 5 strzałów,

$P_{m\acute{s}r\ cp}$ - średnie ciśnienie maksymalne mierzone czujnikiem piezoelektrycznym uzyskane z serii 5 strzałów,

$\Delta P_{max\ cp}$ - największe odchylenie ciśnienia mierzonego czujnikiem dla pojedynczego strzału w stosunku do ciśnienia średniego uzyskanego z serii 5 strzałów,

Makieta* - balistyczna atrapa pocisku podkalibrowego o masie $q = 10,5\ [kg]$.

Różnice we wskazaniach wyżej przedstawionych metod pomiarowych wynikają z:

- charakteru pomiaru - mechaniczny przy zastosowaniu przyrządów zgnio-

$P_{m\acute{s}r\ 7cm^3}$ - average maximal pressure measured by crushing devices of $7\ cm^3$ capacity for a series of 5 shots,

$\Delta P_{max\ 7cm^3}$ - the greatest deviation of the pressure measured by the crushing devices with $7\ cm^3$ capacity for the individual shot received for a series of 5 shots,

$P_{m\acute{s}r\ 13,7cm^3}$ - average maximal pressure measured by crushing devices of $13,7\ cm^3$ capacity for a series of 5 shots,

$\Delta P_{max\ 13,7cm^3}$ - the greatest deviation of the pressure measured by the crushing devices with $13,7\ cm^3$ capacity for the individual shot referred to the average pressure for a series of 5 shots,

$P_{m\acute{s}r\ cp}$ - average maximal pressure measured by piezoelectric sensor for a series of 5 shots,

$\Delta P_{max\ cp}$ - the greatest deviation of the pressure measured by the sensor for an individual shot referred to the average pressure for a series of 5 shots,

Mock-up* - ballistic mock-up of the kinetic projectile with the mass of $q = 10.5\ [kg]$.

The differences of results occurring between the measurement methods presented above are caused by:

towych oraz mechaniczno-elektryczny w przy zastosowaniu czujnika piezoelektrycznego,

- odległości od dna okucia - przyrządy zgniotowe umieszcza się bezpośrednio na dnie, natomiast czujnik piezoelektryczny powyżej okucia metalowego,
- kierunku działania gazów prochowych względem urządzeń pomiarowych - równoległe przy zastosowaniu przyrządów zgniotowych i prostopadłe przy zastosowaniu czujnika piezoelektrycznego.

5. Wnioski

Ze względu na różnorodność przedstawionych metod pomiaru ciśnienia maksymalnego i ilości czynników wpływających na pomiar, kłopotliwym staje się klasyfikacja wniosków według spójnego kryterium. Wobec tego wnioski obejmujące czynności związane z właściwym przygotowaniem sprzętu do badań, prowadzeniem pomiarów na stanowisku ogniowym i analizą otrzymanych wyników uzyskanych podczas strzelania wyłącznie na stanowisku Leopard zebrano w całość i przedstawiono poniżej:

- niezależnie od rodzaju pocisku ciśnienie zmierzone czujnikiem piezoelektrycznym było wyższe od ciśnienia uzyskanego za pomocą przyrządów zgniotowych,
- w każdym przypadku ciśnienie uzyskane przez pomiar przyrządami o objętości $13,7 \text{ cm}^3$ było wyższe od ciśnienia otrzymanego z przyrządów o objętości 7 cm^3 ,
- przy pomiarze ciśnienia metodą zgniotową istnieje konieczność rozcięcia naboju w celu umieszczenia na jego dnie przyrządów zgniotowych, co wydłuża czas badania, lub wymaga wcześniejszego przygotowania naboju, natomiast pomiar metodą piezoelektryczną można prowadzić przez całe badanie przy jednokrotnej adaptacji czujnika,
- zastosowanie metody piezoelektrycznej

- Character of measurement – mechanical, with the use of crushing devices and mechanical-electrical, with the use of piezoelectric sensor,
- Distance to the base of the ferrule – the crushing devices are placed directly on the base whereas the piezoelectric sensor above the metallic ferrule,
- Direction of action of powder gases in relation to the measurement devices – parallel action for the crushing devices and perpendicular for the piezoelectric sensor.

5. Conclusions

It is not easy to find a simple criterion for evaluation of conclusions arising from maximal pressure measurements as different methods were presented and number of factors affected the measurement. For this reason the conclusions concerning the activities for proper preparation of the equipment for testing, execution of tests in the gun site and the analysis of results received exclusively on the "Leopard" site were collected and presented below:

- Independently on the type of projectile the pressure measured by the piezoelectric sensor was higher than pressure received by the crushing devices,
- For each case the pressure received from measurement by 13.7 cm^3 devices was higher than pressure received by 7.0 cm^3 devices,
- At the measurement of the pressure by the crushing method the cartridge has to be cut out in order to fix the crushing devices in its base, what increases time of tests or requires the cartridges have to be prepared earlier, whereas the piezoelectric method may be used all the time at a single adaptation of the sensor,
- Application of the piezoelectric method is possible after completing some complicated and in conse-

- jest możliwe po wykonaniu skomplikowanych technologicznie, a co za tym idzie kosztownych zabiegów polegających na wywierceniach poprzecznego otworu w ścianie komory naboju i specjalnego gniazda od strony nasady zamkowej, które należy powtarzać po każdej wymianie lufy lub armaty,
- w przypadku pomiaru metodą piezoelektryczną wykres przebiegu ciśnienia pozwala na określenie znacznie szerszego spektrum parametrów balistyki wewnętrznej (szczególnie przydatnych w czasie prac badawczo-rozwojowych),
 - różnice otrzymywanych pomiarów w przypadku przyrządów zgniotowych wynikają z czynników dotyczących budowy, objętości i sposobu odbioru przyrządów oraz rodzaju, ewentualności obciążenia i sposobu odczytu pomiaru zgniotków miedzianych,
 - użycie przyrządów zgniotowych z miedzianymi zgniotkami cylindrycznymi podlegającymi wstępnemu obciążeniu wymaga poznania przewidywanego ciśnienia,
 - przyrządy ze zgniotkami kulowymi są łatwiejsze w przygotowaniu niż przyrządy ze zgniotkami cylindrycznymi, ponieważ nie trzeba ich wstępnie obciążać,
 - zastosowanie dwóch wstępnych obciążników w celu otrzymania współczynnika sztywności dla pojedynczego zgniotka jest najbardziej dokładnym sposobem przygotowania sprzętu, ponieważ podczas pomiaru bazuje się na indywidualnych obliczeniach, a nie zbiorczych odczytach z tabel,
 - czas potrzebny na przygotowanie przyrządów zgniotowych (jeszcze przed umieszczeniem ich w naboju) w ilości kilkunastu sztuk jest znacznie dłuższy niż przygotowanie czujnika piezoelektrycznego,
 - szybsza weryfikacja uszkodzeń i pod-
- sequence expensive technological steps such as boring a lateral hole through the wall of the cartridge chamber and a special seat from the side of the breech block which have to be repeated after each replacement of the barrel or the gun,
- In the case of measurements by the piezoelectric method the graph of pressure may be used to identification of a much greater number of internal ballistics parameters (especially for research-development purposes),
 - Differences in received results for crushing devices are caused by factors relating to the structure, capacity and acceptance methods of the devices, and the character and eventuality of cramping, and finally to the way of reading out the measurements from the copper crushers,
 - Use of crushing devices with the cylindrical copper crushers which need to be pre-cramped requires to know the expected pressure,
 - Devices with spherical crushers have not to be pre-cramped and can be prepared more easily than the devices with cylindrical crushers,
 - The application of two pre-cramping steps to receive the coefficient of stiffness for the individual crusher is the most accurate way for preparation of the equipment, because the measurement is based on individual calculations and not on aggregated reads from the tables,
 - The time needed for preparation of a dozen of crushing devices (before placing them into the cartridge) is much longer than preparation of the piezoelectric sensor,
 - If a measurement of the pressure differs unreasonably from the others after a shot, then the verification of defects and the repairing action is

jęcie działań naprawczych w przypadku przyrządów zgniotowych, niż z całego zestawu piezoelektrycznego po strzale, podczas którego pomiar ciśnienia odbiega od pozostałych,

- przy pomiarze ciśnienia metodą zgniotową istnieje ryzyko nieodszukania przyrządów po strzale, dlatego w celu zmniejszenia tej ewentualności należy pamiętać o odpowiednim załadunku naboju (który powinien być obrócony wokół własnej osi tak, aby przyrządy zgniotowe znajdowały się najbliżej od dolnej części lufy),
- przy pomiarze ciśnienia metodą piezoelektryczną istnieje ryzyko poluzowania się złącza gwintowego łączącego czujnik z przewodem sygnałowym, które wpływa na pomiar i czasochłonne czynności naprawcze.

Podsumowując, każda z opisanych wyżej metod posiada zalety i wady, jednak jednoczesna możliwość pomiaru ciśnienia przyrządami zgniotowymi i czujnikiem pozwala na zebranie większej ilości informacji na temat badanego strzału. Ze względu na liczne czynniki wpływające na pomiar i użytkowanie sprzętu badawczego trudno jednoznacznie zdecydować, która z metod jest lepsza i stosować tylko jedną podczas badań. Pomiar ciśnienia czujnikami piezo jest dokładniejszy, natomiast przyrządy zgniotowe umożliwiają pomiar ciśnienia na sprzęcie bojowym. Na przestrzeni wielu lat pomiar ciśnienia prowadzono jedynie metodą zgniotową przejętą od Rosjan, którzy dodatkowo posiadali kontrolne oraz wzorcowe przyrządy zgniotowe do weryfikacji i badań odbiorczych roboczych przyrządów zgniotowych.

Metoda pomiaru za pomocą czujnika piezoelektrycznego została przejęta od państw zachodnich, które opracowały również metodę pomiaru ciśnienia przyrządami zgniotkowymi o objętości $13,7 \text{ cm}^3$ ze zgniotkami miedzianymi kulkowymi o średnicy 6 mm bez wstępnego obcisku. Początkowo pomiar czujnikiem piezoelektrycznym był stosowany pod kątem naukowo-dydaktycznym, jednak obecnie odgrywa on coraz

quicker for crushing devices than for a whole piezoelectric system,

- When the pressure is measured by the crushing method there is a risk that the devices are not found after the shot and for this reason it has to be reduced by a suitable loading of the cartridge (it has to be oriented against its axis in a way providing possibly the lowest position of the crushing devices in the barrel),
- There is a risk of an untightening of the screwed connector fastening the sensor to the signal cable when the pressure is measured by the piezoelectric method, and that affects the measurement and repairing activities.

Summing up, each of methods described above has advantages and disadvantages but a simultaneous possibility for measuring the pressure by the crushing devices and the sensor provides greater amount of information about the investigated shot. Because of numerous factors affecting the measurement and the use of testing equipment it is difficult to decide clearly which method is better and has to be used exclusively in testing. The measurement of pressure by piezo sensors is more accurate whereas the crushing devices can be used to measure the pressure on the ordnance being in service. For many years only the crushing method was used to measure the pressure following the methodology taken from Russian specialists who additionally had the gauge and reference crushing devices for verification and acceptance tests of the working crushing devices.

The piezoelectric sensor measurement method was taken from Western countries where the measurement method with crushing devices of 13.7 cm^3 capacity and crushing copper balls of 6.0 mm diameter, applied without any initial cramping, was also developed. First measurements with the piezoelectric sensor were deployed for scientific-educational aims but now they become more important and in many cases

większą rolę i niejednokrotnie (po zatwierdzeniu zmian przez odpowiednie organy w metodykach badań) stanowi kryterium odbioru amunicji oraz jej elementów.

(after approval of changes in testing methodologies by relevant authorities) they create a criterion for acceptance of ammunition and its components.

Literatura / Literature

Handling Instructions for NATO-Crusher Measuring Apparatus. (1998). Germany.

Instrukcja Nr 5316-62,,B” *Odbiorczych i kontrolnych badań balistycznych prochów i ładunków do dział artyleryjskich i moździerzów.* (1964).Warszawa: BKiDT.

Kistler Group. (2010). *Instruction Manual: Charge Meter Type 5015A.* Switzerland.

Ministerstwo Obrony Narodowej (MON). (1992). *Wojskowa Norma Branżowa WBN-91/1003-54: Prochy i ładunki miotające do naboju artyleryjskich, moździerzowych i granatnikowych. Badania balistyczne.* Zielonka: Ministerstwo Obrony Narodowej.

Ministerstwo Obrony Narodowej (MON). (2006). *Norma Obronna NO-13-A235: Amunicja artyleryjska; Naboje 120 x 570 mm do gładkolufowych armat czołgowych; Wymagania.* Warszawa: MON.

Pankowski, Z. (1987). *Uzbrojenie wozów bojowych,* Warszawa: Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej.

Pico Technology. (2009). *Quick Start Guide: Picoscope PC Oscilloscope.* United Kingdom.

