



DYNAMICZNE BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE MATERIAŁÓW Z WOLFRAMOWYCH STOPÓW CIĘŻKICH PRZEZNACZONYCH NA RDZENIE POCISKÓW TYPU APFSDS – T

DYNAMIC STRENGTH TESTS OF MATERIALS FROM TUNGSTEN HEAVY ALLOYS DESIGNED FOR PENETRATORS OF APFSDS-T PROJECTILES

Leszek CYBULA

Instytut Mechaniki i Poligrafii, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska,
Zakład Mechaniki i Techniki Uzbrojenia, Narbutta 85, 02-524 Warszawa
*The Institution of Mechanics and Armament Technologies at the Faculty of Production
Engineering and Institute of Mechanics and Polygraphy of Warsaw University of Technology,
85 Narbutta St., 02-524 Warsaw, Poland*

Author's e-mail address: leszekcybul@o2.pl; ORCID: 0000-0002-8897-4779

DOI 10.5604/01.3001.0013.5898

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych, materiałów z wolframowych stopów ciężkich /WHA/ przeznaczonych, na rdzenie pocisków podkalibrowych typu APFSDS–T. Badania wytrzymałościowe materiałów, WHA prowadzono w warunkach silnych obciążeń dynamicznych, tj. za pomocą strzelania. W pracy podano teoretyczny sposób wyznaczenia naprężeń w krytycznych przekrojach pocisku badawczego, opisano specjalnie zbudowane do badań stanowisko badawcze z 30 mm lufą balistyczną o gładkim przewodzie oraz opisano metodykę i wyniki badań. Szczególnie interesujące, były badania, w których materiał poddawany, był różnorodnym obciążeniom dynamicznym, pochodzącym zarówno od sił ciśnienia gazów, jak i sił poprzecznych występujących podczas ruchu pocisku w lufie.

Słowa kluczowe: wolframowe stopy ciężkie, rdzeń, pocisk, wytrzymałość

1. Wstęp

Jednym z tematów realizowanych w ramach projektu „BIZMUT” jest opracowanie technologii wytwarzania materiału z wolframowych stopów ciężkich /WSC/, przeznaczonego

Abstract: The paper presents results of strength tests for tungsten heavy alloys (WHA) designated for the rods of APFSDS–T kinetic projectiles. The strength tests of WHA materials were carried out in conditions of heavy dynamical loads i.e. by the firing. The paper gives a theoretical concept for the identification of stresses within the critical cross-sections of the investigated projectile, and a description of a testing stand which was specially prepared and equipped with 30 mm smooth bore ballistic barrel, and description of methodology and test results. It was especially interesting to test the material against various dynamical loads originating both from the forces of gas pressure and the crosswise forces occurring at the projectile's move in the barrel.

Keywords: tungsten heavy alloys, rod, projectile, strength

1. Introduction

Development of technologies for fabrication of material made of tungsten heavy alloys (WHA) designated to the rods of 120 mm APFSDS-T projectiles

czonogo na rdzeń do 120 mm pocisku typu APFSDS-T. Podczas procesu opracowania takiego materiału niezbędne jest przeprowadzenie szeregu badań kontrolnych. Badania te mają na celu sprawdzenie czy parametry wytrzymałościowe wytwarzanego materiału oraz jego własności użytkowe spełniają założone przez konstruktora parametry.

W planowaniu badań należy uwzględnić warunki, w jakich pracuje badany materiał w gotowym wyrobie. Szczególnie istotne są: rodzaj oraz wielkość i charakter występujących obciążeń. Dotychczas przy wytwarzaniu materiałów z wolframowych stopów ciężkich, wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych materiału dokonuje się prowadząc badania w warunkach statycznego obciążenia. Badania te wykonuje się zazwyczaj na maszynie wytrzymałościowej, bądź też z wykorzystaniem młota uderowego.

W rzeczywistości, w tak specyficznym wyrobie jakim jest pocisk, materiał rdzenia pracuje w warunkach bardzo silnego obciążenia dynamicznego. W efekcie wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych jedynie w warunkach obciążeń statycznych może prowadzić do znacznych błędów. W praktyce, ostateczne sprawdzenie parametrów badanego materiału w warunkach dynamicznych przeprowadza się dopiero na gotowym wyrobie, strzelając projektowanym pociskiem. Pocisk ten zazwyczaj nazwany jest pociskiem etatowym. Bardzo często zdarza się, że podczas strzału następuje zniszczenie rdzenia i w efekcie uszkodzenie przewodu lufy. Dodatkowo, badania takie wymagają stosowania specjalnych luf balistycznych, a strzelanie można prowadzić korzystając z dużego poligonu. Taki sposób prowadzenia badań sprawia, że występuje szereg negatywnych czynników dotyczących zarówno bezpieczeństwa, jak i kosztów badań.

Do głównych czynników związanych z bezpieczeństwem i kosztami należą:

- niebezpieczeństwo uszkodzenia lufy podczas strzelania pociskiem, w którym rdzeń jest wykonany z materiału o nieznanych charakterystykach dynamicznych,
- długi czas trwania badań /brak możli-

is one of subjects of „BIZMUT” project. Developing process of such material requires a series of checking tests. The tests are aimed to examine if the strength parameters of produced material meet the specifications taken by designers.

Working conditions of the investigated material in the final article have to be considered at planning the tests. The type and magnitude and character of applied loads are especially important. Up to now at the production of materials from tungsten heavy alloys the strength parameters were determined by testing in conditions of static loads. These tests are usually made by using a strength tester or an impact hammer.

In the reality of such specific article as the projectile, the material of the rod is subjected to heavy dynamic loads. In effect, the identification of strength parameters only in conditions of static loads may lead to significant errors. In practice the final examination of parameters of tested material in dynamical conditions is carried out by using a ready article for shooting with a designed projectile. Such projectile is usually named as a service projectile. In many cases the rod is destructed at the shot what damages the barrel bore. Moreover, special ballistic barrels have to be deployed at such tests and the shots can be fired on the large proving ranges. Such way of testing involves a series of negative factors for both the safety and costs of the tests.

There are following factors concerning the safety and costs:

- Danger of damaging the barrel at firing a projectile with a penetrator made of material with unknown dynamical characteristics,
- Long time of testing /lack of possibilities for frequent use of the ranges/,
- Troubles connected with acquisition of a suitable set of instruments for the testing stand,
- High costs of tests /cost of the

- wości częstego korzystania z poligonu/,
- kłopoty z uzyskaniem odpowiednio oprzyrządowanego stanowiska badawczego,
- duże koszty badań /koszt poligonu, naboju itp./.

Uwzględniając wyżej wymienione czynniki, dla obniżenia kosztów badań i skrócenia czasu niezbędnego na opracowanie nowego materiału, opracowano metodę pozwalającą ocenić czy badany materiał spełnia założone wymagania.

Dla zrealizowania badań wykonano następujące czynności:

- przeprowadzono stosowne obliczenia balistyczno - konstrukcyjne,
- zbudowano stanowisko badawcze,
- zaprojektowano specjalny nabój z pociskiem badawczym.

2. Idea badań

Podczas procesu projektowania pocisków typu APFSDS-T niezbędne jest przeprowadzenie wielu badań kontrolnych strzelaniem. Podczas tych badań bardzo często dochodzi do uszkodzenia pocisku. Na podstawie obserwacji, doświadczeń oraz analizy wyników badań poligonowych stwierdzono, że uszkodzenie pocisku w lufie związane jest najczęściej z uszkodzeniem rdzenia. W przypadkach, gdy rdzeń wykonany jest z wolframowych stopów ciężkich, uszkodzenie to występuje z reguły w dwóch przekrojach. Przekroje te leżą zazwyczaj na styku rdzenia z czołowymi powierzchniami sabotu i nazywane są przekrojami niebezpiecznymi. Miejsca, w których dochodzi do uszkodzeń rdzenia pokazano na rys. 1.

range, cartridge, etc./.

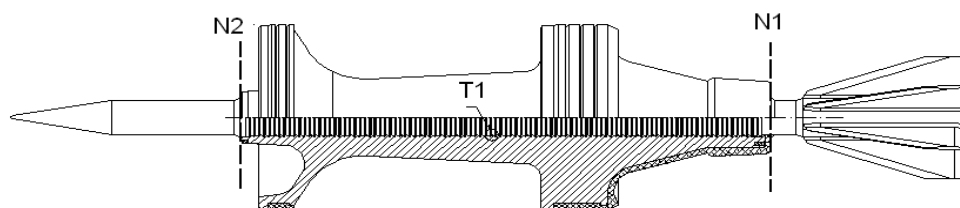
In order to reduce the costs of tests and the time needed for development of new material, and considering the above mentioned factors, a method was developed to assess if the tested material meets the accepted specifications.

Following activities were undertaken to perform the tests:

- Dedicated ballistic-structural calculations were executed,
- A testing stand was built,
- A special cartridge was designed with a testing projectile.

2. Conception of Tests

Designing process of APFSDS-T projectiles requires a lot of firing tests to be executed. During these tests the projectile is often damaged. The observations, experience and analysis of range tests results say that destruction of the projectile in the barrel in most cases is connected with the penetrator's break. In the case when the penetrator is made of tungsten heavy alloys this break usually takes place in two cross-sections. These cross-sections are usually placed where the penetrator contacts to the head surfaces of sabot and are named as critical cross-sections. The places where the penetrator breaks are shown in Fig. 1.



Rys. 1. Widok pocisku APFSDS-T z zaznaczonymi przekrojami niebezpiecznymi N1 i N2

Fig. 1. View of APFSDS-T projectile with marked critical cross-sections N1 and N2

Dla zapewnienia prawidłowego funkcjonowania pocisku niedopuszczalne jest, aby w wyznaczonych przekrojach niebezpiecznych przekroczone zostały dopuszczalne naprężenia dla materiału, z którego wykonany jest rdzeń. Uszkodzenie rdzenia podczas strzału w ww. przekrojach świadczy o tym, że w przekrojach tych przekroczone zostały dopuszczalne naprężenia dla materiału, z którego wykonany jest rdzeń. Pęknięcie rdzenia następuje prawie zawsze w tylnej części rdzenia, tj. w przekroju N1. Wartości naprężeń, w tym przekroju rdzenia, można łatwo wyznaczyć na podstawie znajomości wartości ciśnienia panującego podczas strzału w przestrzeni zapociskowej oraz wymiarów i mas poszczególnych części pocisku i rdzenia. Prowadzenie badań materiału z WSC na rdzeń pocisku z wykorzystaniem pocisku etatowego jest kosztowne i pracochłonne. Dla obniżenia kosztów badań oraz przyspieszenia realizacji prac badawczych nad nowym materiałem przyjęto, że badania będą prowadzone nie na pocisku etatowym kal. 120 mm, a na specjalnie do tego celu zaprojektowanym pocisku badawczym kal. 30 mm z rdzeniem wykonanym z badanego materiału WSC. Jeżeli na rdzeniu pocisku badawczego zostanie wykonane osłabienie w postaci rowka, to w ten sposób zostanie stworzony przekrój niebezpieczny N1, w którym może nastąpić urwanie rdzenia. Jeżeli podczas strzelania pociskiem badawczym nie nastąpi urwanie rdzenia w przekroju niebezpiecznym N1, a występujące w nim wartości naprężeń zredukowanych będą, większe lub równe naprężeniom występującym w przekroju N1 pocisku etatowego to można przyjąć, że badany materiał WSC spełnia postawione wymagania wytrzymałościowe dla materiału rdzenia pocisku etatowego. Jako pocisk etatowy przyjęto 120 mm pocisk APFSDS-T opracowany przez WITU Zielonka. Planując badania należy uwzględnić fakt, że badania były prowadzone z użyciem pocisku o kalibrze 30 mm, który jest mniejszy niż kaliber pocisku etatowego (120 mm).

Uzyskane wyniki będą wiarygodne jedynie wówczas, gdy spełnione zostaną dwa kryteria. Do kryteriów tych należą: kryterium

In order to secure the proper functioning of the projectile it is unacceptable that the tolerable stresses of the material the penetrator is made from are exceeded in the indicated critical cross-sections. If the penetrator is broken at firing in the cross-sections mentioned above it means that the tolerable stresses for the material of penetrator were exceeded. The penetrator usually breaks at its rear part, i.e. in N1 cross-section. The values of stresses for this penetrator cross-section may be easily identified by knowing the values of pressure in the space behind the projectile at firing, and the dimensions and masses of particular parts of the projectile and the penetrator. Testing the material received from the WHA by using the service projectile is expensive and time consuming. In order to reduce the costs of tests and speed the development work on the new material it was accepted that instead of 120 mm service projectile the tests will be performed by deploying a specially designed testing projectile of 30 mm calibre with the penetrator made of the tested WHA material. If the penetrator of the testing projectile is weakened by a cannelure then in such way a critical cross-section N1 is created where the penetrator may break. If the penetrator does not break in the critical cross-section N1 at firing the testing projectile, and the existing values of reduced stresses are greater or equal to the stresses occurring in N1 cross-section of the service projectile, then it may be accepted that the tested WHA material meets the strength specifications for the service projectile penetrator material. 120 mm APFSDS-T projectile developed by MIAT (Military Institute of Armament Technology), Zielonka was taken as the service projectile. At planning the tests it has to be considered that the tests are carried out on 30 mm projectile, which is smaller than calibre of the service projectile (120 mm).

The received results will be reliable only if two criteria are met. These criteria concern the similarity of shapes for projectiles rear parts and the similarity of

podobieństwa kształtu tylnej części pocisku oraz kryterium podobieństwa obciążeń.

Pierwsze z tych kryteriów wymaga, aby kształt pocisku badawczego, w którym zastosowano badany materiał, był podobny do kształtu pocisku etatowego.

Drugie z kryteriów spełnione jest wówczas, gdy wyężenie materiału w wybranych przekrojach pocisku badawczego jest takie samo, jak w odpowiadających im przekrojach pocisku docelowego.

3. Obliczenia wstępne

Dla ustalenia wymiarów konstrukcyjnych pocisku badawczego oraz wartości naprężeń występujących w poszczególnych jego przekrojach, wykonano szereg obliczeń wstępnych balistycznych i wytrzymałościowych.

W tym celu:

- ustalono parametry balistyczne i konstrukcyjne dla pocisku etatowego,
- dla pocisku etatowego wyznaczono przekroje krytyczne i obliczono występujące w nich naprężenia zredukowane,
- określono wymagania wytrzymałościowe stawiane badanemu materiałowi na rdzeń,
- wykonano obliczenia balistyczne i wytrzymałościowe, tj. wyznaczono ciśnienie gazów prochowych i średnicę rdzenia w przekroju krytycznym dla pocisku badawczego.

3.1. Obliczenia wytrzymałościowe

Obliczenia wytrzymałościowe mają na celu wyznaczenie naprężeń występujących w tzw. przekrojach niebezpiecznych pocisku oraz sprawdzenie prawidłowości zaprojektowania i dobrania wymiarów. Do wyznaczenia naprężeń przyjęto następujące założenia:

- występujące odkształcenia mają charakter liniowy i sprężysty,
- ciśnienie działa równomiernie na tylną część sabotu i rdzenia.

Występujące w pocisku niebezpieczne przekroje zostały zobrazowane na rys. 1.

the loads.

The first of these criteria requires the shape of the testing projectile made of the tested material is similar to the shape of service projectile.

The second criteria is met when the overstraining of the material in selected cross-sections of the testing projectile is the same as for the corresponding cross-sections of the final projectile.

3. Initial Calculations

A series of initial ballistic and strength calculations was made to establish the structural dimensions and the values of stresses existing in particular cross-sections of the testing projectile.

For this reason:

- The ballistic and structural parameters of the service projectile were established,
- For the service projectile the critical cross-sections were identified and the reduced stresses were calculated for them,
- Strength specifications for the tested material of the penetrator were identified,
- Ballistic and strength calculations were made, i.e. the pressure of powder gases and the diameter of the penetrator in critical cross-section were identified for testing projectile.

3.1. Strength Calculations

The strength calculations are aimed to identification of stresses existing in the so called critical cross-sections of the projectile and to examination of the correctness for the designing and selection of dimensions. Following assumptions were taken for determination of stresses:

- Existing stresses have linear and elastic character,
- The pressure acts equally to rear parts of the sabot and penetrator.

The critical cross-sections existing in the projectile are illustrated in Fig. 1.

3.1.1. Wyznaczenie sił i przyspieszeń działających na pocisk w lufie

Podczas strzału na pocisk w lufie działają osiowe i odśrodkowe siły bezwładności. W przypadku pocisków typu APFSDS, ze względu na brak ruchu obrotowego, siły odśrodkowe nie występują.

Równanie ruchu postępowego pocisku APFSDS wzdłuż przewodu lufy ma postać:

$$P = \varphi \cdot q \cdot \frac{dv}{dt} = p \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

gdzie: P - siła działająca na pocisk,

$\frac{dv}{dt}$ - przyspieszenie pocisku,

p - ciśnienie gazów prochowych,

d - kaliber pocisku,

φ - współczynnik fikcyjności masy pocisku,

q - masa pocisku.

Maksymalna wartość siły parcia gazów na pocisk P_m występuje w chwili, gdy w przestrzeni zapociskowej ciśnienie gazów prochowych osiąga wartość maksymalną:

$$P_m = \varphi \cdot q \cdot \frac{dv}{dt} = p_m \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

gdzie: p_m - ciśnienie maksymalne gazów prochowych

Maksymalne przyspieszenie pocisku wynosi:

$$\frac{dv}{dt} = P_m \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \varphi \cdot q}$$

podstawiając za $\frac{dv}{dt} = k_1 \cdot g$

gdzie: k_1 - współczynnik przyspieszenia liniowego,

g - przyspieszenie ziemskie = 9.81[m/s²]

i przekształcając wzór względem k_1 , współczynnik przyspieszenia liniowego ma postać:

$$k_1 = \frac{p_m \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \varphi \cdot q \cdot g}$$

3.1.1. Forces and Accelerations Acting to Projectile Inside Barrel

Projectile inside the barrel is subjected to action of axial and centrifugal inertial forces during the shot. In the case of APFSDS projectiles the centrifugal forces do not exist as there is no rotation.

Advance movement of APFSDS projectile along the barrel bore is expressed by:

where: P – force acting to the projectile,

$\frac{dv}{dt}$ - the acceleration of projectile,

p – the pressure of powder gases,

d – projectile's calibre,

φ - projectile mass fictitious coefficient,

q – mass of projectile.

Maximal force P_m of pressured gases acting to projectile takes place when the pressure of powder gases has the maximal value in the space behind the projectile:

where: p_m – maximal pressure of powder gases

Maximal acceleration of the projectile is:

by substituting $\frac{dv}{dt} = k_1 \cdot g$

where: k_1 – coefficient of linear acceleration,

g – Earth acceleration = 9.81[m/s²]

and transforming the equation against k_1 , the coefficient of linear acceleration is:

Współczynnik ten ma wartość stałą dla danego pocisku i jest bezwymiarowy. Jego wielkość pokazuje ile razy przyspieszenie pocisku jest większe od przyspieszenia ziemskiego. Znając wartość tego współczynnika, maksymalną wartość siły bezwładności działającej w dowolnym przekroju pocisku można opisać wzorem:

$$P_i = q_i \cdot k_1 \cdot g$$

gdzie: q_i - masa części pocisku leżąca poniżej rozpatrywanego przekroju.

Powyższy wzór jest słuszny, gdy wyznaczone są naprężenia w przekroju N1 (rys.1).

W przypadku, gdy wyznaczone są naprężenia w przekroju N2 (rys. 1) za masę q_i należy podstawić masę części rdzenia leżącą powyżej rozpatrywanego przekroju.

3.1.2. Wyznaczenie naprężeń w przekroju niebezpiecznym N1

W przekroju niebezpiecznym N1 występują naprężenia rozciągające σ_1 pochodzące od osiowej siły bezwładności P_1 i naprężenia ściskające σ_2 i σ_3 , pochodzące od siły parcia ciśnienia gazów prochowych F_1 .

Wypadkowa siła osiowa oddziałująca na rdzeń w przekroju niebezpiecznym wynosi:

$$F_{N1} = P_1 - F_1$$

podstawiając za

$$F_1 = \frac{\pi d_r^2}{4} p_m$$

gdzie: d_r – średnica rdzenia poza przekrojem krytycznym /poniżej/

i dokonując odpowiednich przekształceń, otrzymano ostatecznie wzór na wypadkową osiową siłę działającą w przekroju niebezpiecznym N1 w postaci:

The coefficient is dimensionless and has a constant value for a specific projectile. Its value shows how many times the acceleration of projectile is greater than the Earth acceleration. Knowing the value of this coefficient, the maximal value of inertia force acting in any cross-section of the projectile may be described by:

where: q_i – mass of the projectile part placed below the considered cross-section.

Above expression is just when the stresses in cross-section N1 (Fig.1) are determined.

In the case when stresses are determined for cross-section N2 (Fig.1) penetrator's fragment mass above the considered cross-section has to be substituted for mass q_i .

3.1.2. Determination of Stresses for Critical Cross-section N1

In critical cross-section N1 there are tensile stresses σ_1 originating from the axial inertial force P_1 and compressing stresses σ_2 and σ_3 caused by pushing force F_1 of the powder gases pressure.

The resultant axial force acting to the penetrator in the critical cross-section is:

by substituting

where: d_r – diameter of penetrator beyond the critical cross-section /below/

and after some transformations a final expression for the resultant axial force acting in the critical cross-section N1 is received in form:

$$F_{N1} = q_{N1} \cdot k_1 \cdot g - \frac{\pi d_r^2}{4} p_m$$

gdzie:

q_{N1} - masa elementu pocisku za przekrojem N1,
 k_1 - współczynnik przyspieszenia liniowego pocisku,
 p_m - ciśnienie maksymalne gazów prochowych,
 φ - współczynnik fikcyjności masy

Naprężenia σ_1 w przekroju N1 pochodzące od siły F_{N1} przyjmują postać:

$$\sigma_1 = \frac{F_{N1}}{A_{kr}}$$

gdzie:

A_{kr} - pole powierzchni rdzenia w przekroju N1.

Po podstawieniu i przekształceniach, otrzymano wzór na naprężenia osiowe w przekroju niebezpiecznym rdzenia:

$$\sigma_1 = \frac{q_{N1} \cdot k_1 \cdot g}{\pi \cdot d_{kr}^2} - \left(\frac{d_r}{d_{kr}} \right)^2 p_m$$

Naprężenia ściskające w przekroju N1 pochodzące od ciśnienia gazów prochowych wynoszą:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = -p_m$$

Ze względu na występowanie złożonego stanu naprężenia, należy wyznaczyć naprężenia zredukowane. W tym celu zastosowano hipotezę wyężeniową HMMH.

Wzór na naprężenia zredukowane przyjmuje postać:

$$\sigma_{zred} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Naprężenia zredukowane panujące w przekroju nie powinny przekroczyć dopuszczalnych naprężeń rozciągających.

$$\sigma_{zred} \leq R_m$$

where:

q_{N1} – mass of the projectile element behind the cross-section N1,
 k_1 – coefficient of projectile linear acceleration,
 p_m – maximal pressure of powder gases,
 φ - fictitious coefficient of the mass

Stresses σ_1 in cross-section N1 originating from the force F_{N1} take the form:

where:

A_{kr} - surface of the penetrator N1 cross-section.

After substitution and transformations the relation for axial stresses in the penetrator critical cross-section is received:

The compressing stresses in cross-section N1 originating from the powder gases pressure are:

Due to complex conditions of stressing the reduced stresses have to be determined. For this reason the overstraining hypothesis HMMH is applied.

The reduced stresses may be expressed by:

The reduced stresses existing in the cross-section have not to exceed the permissible tensile stresses.

gdzie:

R_m - wytrzymałość na rozciąganie materiału rdzenia.

3.1.3. Wyniki obliczeń naprężeń dla pocisku etatowego

Na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej 120 mm naboju konstrukcji WITU Zielonka ustalono wymiary oraz wartości mas poszczególnych części i zespołów pocisku, a także wielkość ciśnienia maksymalnego.

Przy wyznaczaniu naprężeń przyjęto, że najbardziej wyężonym przekrojem, w którym występują największe naprężenia zredukowane jest przekrój N1 (rys. 1). i dla niego przeprowadzono stosowne obliczenia.

Obliczenia przeprowadzono dla trzech przypadków obciążenia tj. dla trzech wartości ciśnień maksymalnych:

- przypadek I - gdy ciśnienie maksymalne wynosi $p_m = 500$ MPa, zgodnie z wartością podaną w dokumentacji konstrukcyjnej naboju,
- przypadek II - gdy ciśnienie maksymalne wynosi $p_m = 535$ MPa - według pomiaru z badań metodą zgniotkową dla temperatury ładunku 323K (+50°C),
- przypadek III - gdy ciśnienie maksymalne wynosi $p_m = 653$ MPa - wg pomiaru z badań metodą piezoelektryczną dla temperatury ładunku 323K.

Wyniki obliczeń naprężeń zredukowanych oraz naprężeń składowych występujących w przekroju niebezpiecznym, przedstawiono w tabeli 1.

Zgodnie z wymaganiem dla materiału rdzenia podanym w dokumentacji wytrzymałość na rozciąganie powinna wynosić $R_m \geq 1300$ MPa.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że dla przypadków II i III naprężenia zredukowane w przekroju niebezpiecznym przekraczają granicę wytrzymałości na rozciąganie dla materiału rdzenia.

where:

R_m - tensile strength of the penetrator's material.

3.1.3. Results of Stresses Calculations for the Service Projectile

On basis of designing documentation of 120 mm cartridge the dimensions and masses of projectile particular parts and units were established both with maximal pressure.

It was assumed at determination of stresses that the most overstrained cross-section, with the greatest reduced stresses, is the cross-section N1 (Fig. 1) and for it the relevant calculations were performed.

The calculations were carried out for three options of loads, i.e. for three values of maximal pressure:

- option I - for maximal pressure $p_m = 500$ MPa, according to value given in the cartridge designing documentation,
- option II - for maximal pressure $p_m = 535$ MPa - measured by crushing method for the temperature of charge equal to 323K (+50°C),
- option III - for maximal pressure $p_m = 653$ MPa - measured by the piezoelectric method for charge temperature 323K.

Results of calculations for the reduced stresses and for components of the stresses existing in the critical cross-section are presented in Table 1.

According to specification included in documentation the tensile strength of the penetrator material has to be $R_m \geq 1300$ MPa.

Performed calculations show that the reduced stresses in the critical cross-section for options II and III exceed the tensile strength limit for the penetrator's material.

3.2. Obliczenia naprężeń dla pocisku badawczego

3.2.1. Wymagania dla materiału na rdzeń pocisku badawczego

Stosownie do wymagań wytrzymałościowych, przedstawionych w dokumentacji konstrukcyjnej pocisku etatowego przyjęto, że parametry materiału na rdzeń pocisku badanego powinny wynosić:

– Wytrzymałość na rozciąganie	R_m	\geq	1300 MPa
– <i>Tensile strength</i>			
– Umowna granica plastyczności	$R_{0,2}$	\geq	1200 MPa
– <i>Accepted limit of plasticity</i>			
– Wydłużenie	A_5	$=$	8%
– <i>Elongation</i>			
– Udarność w temperaturze +20°C	K_C	\geq	110 J/cm ²
– <i>Impact strength at +20°C</i>			

Wielkości te dotyczą statycznych warunków obciążenia.

3.2.2. Wyznaczenie parametrów balistycznych i średnicy w przekroju krytycznym

Przy wyznaczaniu parametrów balistycznych konieczne jest uwzględnienie takich czynników jak:

- zachowanie podobieństwa geometrycznego pocisków,
- dopuszczalna wartość ciśnienia gazów prochowych,
- maksymalna i minimalna wielkość średnic pocisku i jego elementów,
- zachowanie podobieństwa dynamicznego naprężeń.

Dla sprawdzenia, czy podczas strzału wielkości naprężeń zredukowanych występujących w przekroju krytycznym nie przekraczają ww. wartości wykonano niezbędne obliczenia.

Przyjęto, że badania prowadzone będą z wykorzystaniem zmodyfikowanej 30 mm lufy armaty Bushmaster II. Dla tej lufy dopuszczalne ciśnienie maksymalne gazów prochowych wynosi $p_m = 530$ MPa. Dokonano stosownych obliczeń balistycznych, w wyniku których dobrano rodzaj prochu i

3.2. Calculations of Stresses for Testing Projectile

3.2.1. Specifications for Material of Testing Projectile Penetrator

In accordance to strength specifications included in designing documentation of the service projectile it was assumed that the parameters of material for the penetrator of testing projectile have to be:

– Tensile strength	R_m	\geq	1300 MPa
– Accepted limit of plasticity	$R_{0,2}$	\geq	1200 MPa
– Elongation	A_5	$=$	8%
– Impact strength at +20°C	K_C	\geq	110 J/cm ²

These parameters refer to the static conditions of loads.

3.2.2. Critical Cross-section Ballistic Parameters and Diameter Identification

Following factors have to be considered at determination of ballistic parameters:

- preservation of geometric similarity for the projectiles,
- permissible value of the powder gases pressure,
- maximal and minimal diameters of projectile and its components,
- preservation of similarity for dynamical stresses.

In order to examine if the values of reduced stresses existing in the critical cross-section do not exceed the above values the necessary calculations were performed.

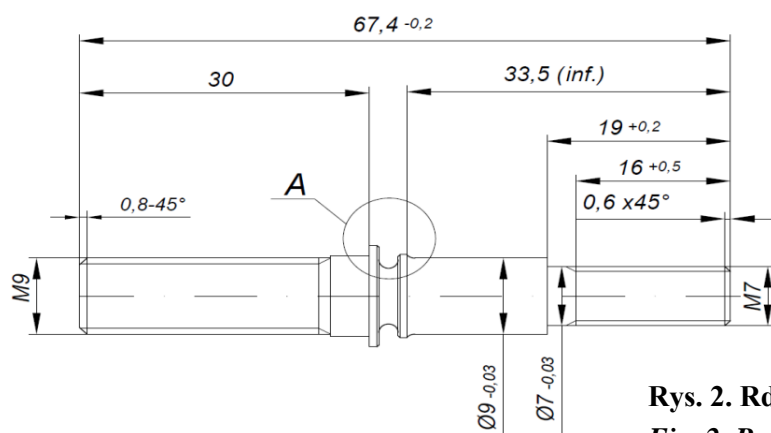
It was accepted that the tests will be carried out by using a modified barrel of 30 mm Bushmaster II gun. Permissible maximal pressure of powder gases for this barrel is $p_m = 530$ MPa. Suitable ballistic calculations were made to match the type of powder and estimate the mass of the

oszacowano masę pocisku badawczego. Stosując podobną metodykę obliczeń, jak dla 120 mm pocisku etatowego, wykonano stosowne obliczenia naprężeń zredukowanych w przekroju niebezpiecznym rdzenia pocisku badawczego.

Obliczenia wykonano dla różnych wielkości mas za przekrojem krytycznym badanego rdzenia oraz dwóch wielkości ciśnień maksymalnych. Ciśnienia maksymalne zmieniano od $p_m = 420$ MPa do $p_m = 560$ MPa. Przyjęto, że naprężenia zredukowane w przekroju krytycznym rdzenia pocisku badawczego i etatowego powinny być takie same. W wyniku obliczeń wyznaczono wartości średnic krytycznych w badanym rdzeniu przy różnych wielkościach mas i ciśnień maksymalnych gazów prochowych. W wyniku obliczeń ustalono, że ze względów konstrukcyjnych i z uwagi na wielkość naprężeń zredukowanych średnica krytyczna /szczegół A/ w rdzeniu powinna wynosić $d_k = 6,4$ mm. Rdzeń pocisku badawczego przedstawiono na rys. 2.

testing projectile. Using similar method of calculations as for 120 mm service projectile the appropriate calculations of reduced stresses were made for the penetrator critical cross-section of the testing projectile.

Calculations were made for various masses behind the tested penetrator critical cross-section and for two values of maximal pressure. The maximal pressure has changed from $p_m = 420$ MPa to $p_m = 560$ MPa. It was assumed that reduced stresses in penetrators critical cross-sections of testing and service projectiles have to be the same. The calculations gave the values of critical diameters for the investigated penetrator at various masses and maximal pressures of powder gases. Basing on the calculations it was set that because of the structural reasons and the values of reduced stresses the critical diameter /detail A/ in the penetrator has to be $d_k = 6.4$ mm. The penetrator of testing projectile is shown in Fig. 2.



Rys. 2. Rdzeń pocisku badawczego

Fig. 2. Penetrator of testing projectile

4. Badania

Dynamiczne badania materiału na rdzeń przeprowadzono w dwóch etapach.

Etap I obejmował badania funkcjonowania stanowiska badawczego oraz działania naboju i pocisku badawczego.

Etap II obejmował badania strzelaniem wytworzonego materiału oraz badania porównawcze tego materiału z materiałami firm zachodnich. Dodatkowo przeprowadzono badanie wpływu ruchu wahadłowego pocisku na wytrzymałość materiału rdzenia.

4. Tests

Dynamic tests of the penetrator's material were executed in two stages.

The I stage comprised the functional tests of the stand, cartridge and testing projectile.

The II stage comprised firing tests of fabricated material and comparative tests of this material with the materials of Western companies. Additionally, the influence of projectile swinging movement on the penetrator's material strength was tested.

Tabela 1. Wyniki obliczeń naprężeń w przekroju niebezpiecznym rdzenia 120 mm pocisku typu APFSDS-T konstrukcji WITU Zielonka

Lp.	Parametr	Miano	PARAMETRY OBCIĄŻENIA		
			Zgodnie z dokumentacją konstrukcyjną	Wg pomiarów z badań dla temperatury ładunku 323K (+50°C)	
				Metodą zgniotkową	Metodą piezo
1	Kaliber pocisku	mm	120	120	120
2	Masa pocisku	kg	6,940	6,940	6,940
3	Masa rdzenia poniżej przekroju krytycznego	g	826,0	826,0	826,0
4	Średnica w przekroju niebezpiecznym	mm	22,10	22,10	22,10
5	Ciśnienie maksymalne gazów prochowych	MPa	500,0	535,0	653,0
6	Masa ładunku miotającego	kg	7,2	7,2	7,2
7	Współczynnik fikcyjności masy	—	1,39	1,39	1,4
8	Przyśpieszenie pocisku	m/s ²	5,880E+05	6,291E+05	7,679 E+05
9	Siła działająca w przekroju kryt. rdzenia	N	2,9387E+05	3,1444E+05	3,8379 E+05
10	Naprężenie wzdłużne	MPa	766,0	820,0	1001,0
11	Naprężenie promieniowe	MPa	-500,0	-530,0	-653,0
12	Naprężenia zredukowane	MPa	1266,0	1350,0	1654,0

Table 1. Results of calculations of stresses in the penetrator critical cross-section for 120 mm APFSDS-T projectile developed by MIAT, Zielonka

No.	Parameter	Dimensions	PARAMETERS OF LOAD		
			According to designing documentation	Measured at charge temperature 323K (+50°C) by	
				Crushing method	Piezoelectric method
1	Projectile calibre	mm	120	120	120
2	Projectile mass	kg	6.940	6.940	6.940
3	Mass of penetrator below the critical cross-section	g	826.0	826.0	826.0
4	Diameter at the critical cross-section	mm	22.10	22.10	22.10
5	Maximal pressure of powder gases	MPa	500.0	535.0	653.0
6	Mass of propelling charge	kg	7.2	7.2	7.2
7	Coefficient of mass fictitiousness	—	1.39	1.39	1.4
8	Acceleration of projectile	m/s ²	5.880E+05	6.291E+05	7.679 E+05
9	Force acting in penetrator critical cross-section	N	2.9387E+05	3.1444E+05	3.8379 E+05
10	Axial stress	MPa	766.0	820.0	1001.0
11	Radial stress	MPa	-500.0	-530.0	-653.0
12	Reduced stress	MPa	1266.0	1350.0	1654.0

4.1. Opis badań etapu I

Celem badań w etapie I było sprawdzenie:

- prawidłowości działania układu miotającego,
- prawidłowości funkcjonowania pocisku podczas ruchu w lufie,
- zachowania /stabilizacji/ pocisku na torze lotu,
- ustalenie wielkości naważki prochowej dla uzyskania odpowiedniego ciśnienia maksymalnego,
- wpływu zmiany masy pocisku badawczego oraz gęstości ładowania na wartość ciśnienia maksymalnego.

Do realizacji tego celu zostało zbudowane odpowiednie stanowisko badawcze.

Badania przeprowadzono w kilku podetapach. Po każdym z podetapów dokonywano oceny uzyskanych rezultatów. W wyniku analizy rezultatów wprowadzano odpowiednie korekty.

4.2. Stanowisko badawcze-budowa

Stanowisko badawcze składało się z następujących elementów:

- 30 mm lufy balistycznej o gładkim przewodzie zamocowanej na tzw. "stendzie",
- układu kontrolno pomiarowego ciśnienia,
- układu pomiarowego prędkości pocisku
- ultraszybkiej kamery do filmowania pocisku po wyjściu z lufy i na torze lotu,
- zestawu 4 tarcz kartonowych w umieszczonych na torze w odległościach: 20 m, 40 m, 60 m oraz 100 m.

W skład układu kontrolno-pomiarowego wchodził tor pomiarowy firmy AVL, składający się z piezoelektrycznego czujnika ciśnienia i wzmacniacza ładunku oraz komputer rejestrujący parametry. Czujnik ciśnienia wkręcony był w ściankę lufy w obrębie komory nabojevej. Układ pomiarowy prędkości pocisku stanowiło urządzenie dopplerowskie firmy THERMA, za pomocą którego rejestrowano prędkość pocisku na torze lotu.

4.1. I-st Stage Tests

I-st stage tests were aimed to:

- Check the correctness of propelling system operation,
- Check the correctness of projectile movement in the barrel,
- Check the flight /stabilisation/ of the projectile on the trajectory,
- Establish the value of powder portion for getting the expected maximal pressure,
- Establish the influence of changes of the testing projectile mass and the density of loading on the value of maximal pressure.

For this reason a special testing stand was built.

Tests were carried out in a few substages. Evaluation of received results was made after completing each of the substages. Needed corrections were implemented in effect of the results analysis.

4.2. Structure of Testing Stand

The testing stand comprises following components:

- 30 mm ballistic barrel with the smooth bore integrated on the stand,
- System for pressure monitoring-measuring,
- Projectile velocity measurement unit,
- High speed camera taking pictures of projectile on the trajectory,
- System of 4 cardboard targets placed on the trajectory at distances: 20 m, 40 m, 60 m and 100 m.

Monitoring-measuring system includes a measurement channel of AVL company built of the piezoelectric pressure sensor and the electric charge amplifier and the computer recording the parameters. The pressure sensor is screwed into the barrel wall near the cartridge chamber. Doppler system of THERMA company measures the projectile velocity on the trajectory.



a)

b)

Fot 1. Stanowisko do badań dynamicznych strzelaniem: a) - lufa do badań materiału w warunkach dynamicznych na stendzie, b) - ultraszybka kamera do filmowania pocisku po wylocie z lufy

Photo 1. Setup for dynamic tests by firing: a) – the barrel for testing the material in dynamic conditions on the stand, b) – high speed camera to take pictures of projectile after leaving the barrel

4.2.1 Budowa naboju badawczego

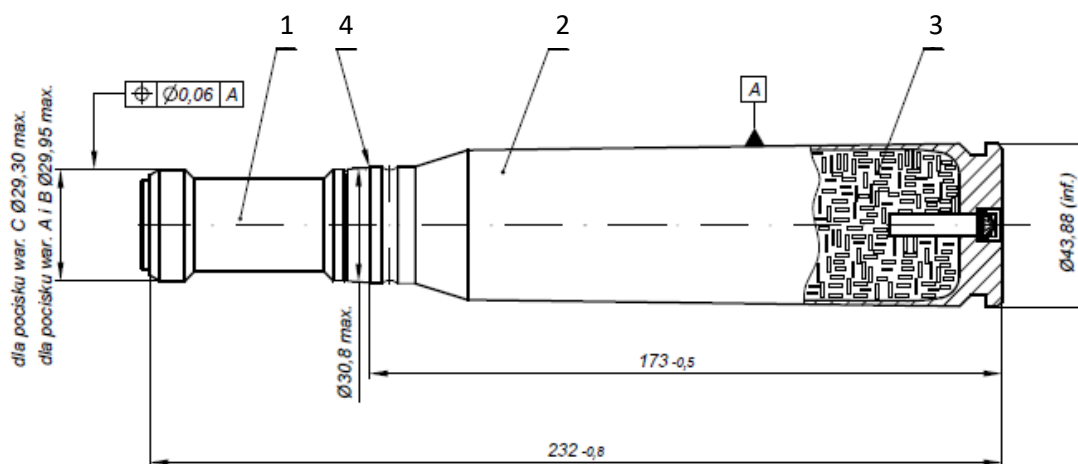
Dla zrealizowania badań, został specjalnie zaprojektowany 30 mm nabój z pociskiem badawczym typu APFSDS, w którym rdzeń wykonany był z opracowywanego materiału.

Dla zmniejszenia kosztów, do budowy wykorzystano łuskę, proch i układ zapłonowy od 30 mm naboju APFSDS. Budowę naboju przedstawiono na rys. 3.

4.2.1 Design of Testing Cartridge

A special design was prepared for 30 mm cartridge with APFSDS testing projectile having the penetrator made of the investigated material.

In order to reduce the costs the design deploys the case, powder and igniting system of 30 mm APFSDS cartridge. Design of the cartridge is shown in Fig. 3.



Rys. 3. Rysunek konstrukcyjny naboju badawczego: 1 - pocisk z rdzeniem z badanego materiału, 2 – łuska stosowana w 30mm naboju APFSDS-T, 3 – ładunek prochowy, 4 – pierścień uszczelniający

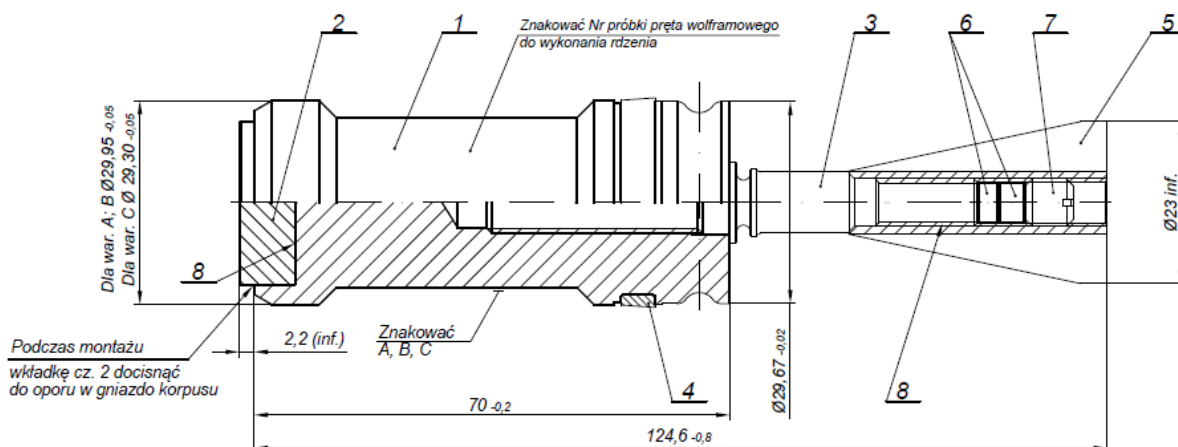
Fig. 3. Design drawing of testing cartridge: 1 – projectile with the penetrator made of investigated material, 2 – case used in 30mm APFSDS-T cartridge, 3 – powder charge, 4 – sealing ring

4.2.2. Budowa pocisku badawczego

Budowę pocisku badawczego przedstawiono na rys. 4. Głównym elementem pocisku jest korpus (1), w który wkręcony jest badany rdzeń (3) wykonany z wolframowego stopu ciężkiego. Dla uzyskania różnych wartości sił bezwładności w przekroju krytycznym rdzenia, w tylnej jego części umieszczono zestaw obciążników (6). Obciążniki zabezpieczone są przed przemieszczaniem wkrętką mocującą (7). Zestaw obciążników stanowią walcowe krążki wykonane ze spieku wolframowego lub stali w ilości 1 ÷ 3 sztuk o średnicy zewnętrznej \varnothing 5,8 mm i grubościach odpowiednio 3 mm, 4 mm i 5 mm. Dla spełnienia kryterium podobieństwa pocisku etatowego do pocisku badanego, wartości względne ich głównych wymiarów w części zapierścieniowej są zbliżone.

4.2.2. Design of Testing Projectile

The design of testing projectile is shown in Fig. 4. The main component of the projectile is a frame (1) with screwed in tested penetrator (3) made of tungsten heavy alloy. In order to get different values of the inertia forces in the critical cross-section of the penetrator, a set of weights (6) was placed in its rear part. The weights are protected against displacement by a fixing screw (7). The set of weights is made of cylindrical circles fabricated from a tungsten sinter or steel in amount of 1 ÷ 3 items, and external diameter \varnothing 5.8 mm, and thickness 3 mm, 4 mm and 5 mm respectively. In order to secure the criterion of likeness between the service and testing projectiles the relative values of their main dimensions for the part placed behind the ring are similar.



Rys. 4. Pocisk badawczy: 1- korpus pocisku , 2 - wkładka dociążająca, 3 - rdzeń z wolframowego stopu ciężkiego, 4 - pierścień uszczelniający, 5- stabilizator, 6 – zestaw obciążników, 7- wkrętka mocująca, 8 – klej

Fig. 4. Testing projectile: 1- frame of projectile , 2 – ballasting insert, 3 – penetrator made of tungsten heavy alloy, 4 – sealing ring, 5- stabilizer, 6 – set of weights, 7- fixing screw, 8 – glue

Budowę rdzenia stosowanego w badaniach oraz jego wymiary przedstawiono szczegółowo na rys. 2.

Rdzeń na swej zewnętrznej powierzchni ma nacięty gwint oraz dodatkowo specjalny rowek osłabiający o średnicy - d_k . Celem wykonania rowka jest stworzenie tzw. przekroju krytycznego, w którym wymuszone

Detailed design of the penetrator used for tests and its dimensions are shown in Fig. 2.

The penetrator has a thread cut on its external surface and an additional special weakening cannellure with diameter - d_k . The cannellure is purposed to create the so called critical cross-section enforcing a

będzie ewentualne pękanie rdzenia po przekroczeniu dopuszczalnych naprężeń.

4.3. Badania strzelaniem w etapie I

Strzelanie na stanowisku badawczym prowadzono z wykorzystaniem naboju badawczych.

Podczas tych badań sprawdzano, czy lufa jest prawidłowo osadzona w stendzie oraz jak funkcjonuje układ odpalania. Ponadto badania te miały na celu sprawdzenie, czy pocisk nie ulega uszkodzeniu podczas strzału i w całości opuszcza przewód lufy. Oceny wytrzymałości pocisku dokonywano na podstawie analizy zdjęć wylotu pocisku z lufy podczas strzału, rejestrowanych za pomocą ultra szybkiej kamery. Dla oceny stabilizacji pocisku, na torze lotu ustawiono tarcze z kartonów w odległościach: 20 m, 40 m, 60 m oraz 85 m od wylotu z lufy. Poprawność stabilizacji oceniano na podstawie analizy kształtu przestrzelin. Dla oceny, czy prawidłowo dobrano wielkość i rodzaj naważki prochowej, podczas strzału rejestrowano ciśnienie gazów prochowych oraz prędkość początkową pocisku. Wartości ciśnień gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej rejestrowano za pomocą czujników metodą PIEZO, zaś prędkość początkową pocisku rejestrowano metodą Dopplera za pomocą aparatury Weibla. Przykładowe wyniki pomiarów uzyskane w badaniach przedstawiono w tabeli 2.

possible breaking of the penetrator when the permittable stresses are exceeded.

4.3. Firing Tests in Stage I

Shooting on the testing position was made with testing cartridges.

During these tests the correctness of barrel integration into the stand and the functionality of a shot triggering system were checked. Moreover tests were aimed to examine if the projectile is not damaged at firing and if it leaves the muzzle in one piece. The strength of the projectile was evaluated by analysing the high speed camera pictures of the projectile at leaving the barrel during the shot. In order to evaluate projectile's stability on the trajectory the cardboard targets were placed at distances: 20 m, 40 m, 60 m and 85 m from the muzzle. Correctness of stabilisation was assessed by analysing the shapes of holes. The pressure of powder gases and the muzzle velocity of projectile were recorded to evaluate if the amount and type of powder charge portion was correct. Values of powder gases pressure in the space behind the projectile were recorded by piezoelectric sensors and the muzzle velocity was measured by instruments of Weibel company exploiting Doppler method. Exemplary results of measurements received at testing are given in table 2.

Tabela 2. Przykładowe wyniki pomiaru ciśnienia, prędkości i stabilizacji

Table 2. Exemplary results of measurements for pressure, velocity and stabilisation

Nr strzału <i>Shot</i>	Nr pocisku <i>Projectile</i>	Masa pocisku <i>Mass of projectile</i>	Masa ładunku prochowego <i>Mass of powder charge</i>	Ciśnienie <i>Pressure</i>	Prędkość <i>Velocity</i>	Stabilizacja <i>Stabilisation</i>
		[g]	[g]	[MPa]	[m/s]	
1	9a	237,5	173,5	447,2	1359	Dobra /OK
2	10	258,3	173,5	453,7	1373	dobra
3	7a	257,9	173,5	459,5	1375	dobra
4	7b	257,5	173,5	469,9	1362	dobra

4.4. Badania – etap II

W tym etapie przeprowadzono badania porównawcze strzelaniem, materiałów na rdzenie pocisków podkalibrowych, zarówno firm zachodnich, jak i wytworzonych w ramach niniejszej pracy.

4.4. Tests – Stage II

On this stage comparative tests were carried out by firing for materials designed to penetrators of kinetic projectiles of Western origin and produced in the frame of described work.



Fot. 2. Tor strzelecki: zestaw tarcz do badania stabilizacji pocisku oraz widoki tarcz z przestrzelinami umieszczonych odległościach 20 m, 40 m, 60 m i 100 m od wylotu lufy

Photo 2. The firing line: set of targets placed at 20 m, 40 m, 60 m and 100 m from the muzzle for checking the stabilisation of projectile and pictures of targets with the holes

4.4.1. Opis badań etapu II

Podczas eksploatacji amunicji etatowej w warunkach poligonowych strzelanie może odbywać się zarówno z luf nowych, jak i o znacznym stopniu zużycia. Wówczas w takich przypadkach, pocisk podczas przemieszczania się w lufie, wykonuje nie tylko ruch postępowy, ale także dodatkowy ruch wahadłowy. Ten czynnik powoduje, że w rdzeniu powstają dodatkowe naprężenia zginające mogące doprowadzić do uszkodzenia pocisku. Dzięki odpowiedniej konstrukcji pocisku badawczego symulowane były dwa przypadki obciążeń.

W pierwszym przypadku celem badań było symulowanie strzelania z nowej lufy o małym stopniu zużycia. Podczas tego bada-

4.4.1. Description of Tests - Stage II

When the service ammunition is fired on the range both new barrels and those with a significant level of wearing may be used. In the second case the projectile in the barrel moves not only in advance direction but additionally is subjected to a swinging movement. This fact generates additional bending stresses which may break the projectile. Due to the special design of the testing projectile two cases of loads were simulated.

In the first case the tests were aimed to simulate the firing with a new barrel having a low level of wearing. The test was aimed to examine if the penetrator of the testing projectile is not damaged in the

nia sprawdzano, czy nie nastąpi uszkodzenie rdzenia pocisku badawczego w chwili, gdy naprężenia w jego przekroju krytycznym osiągają wartości zbliżone do naprężeń występujących w przekroju krytycznym pocisku etatowego.

W drugim przypadku cel badania był podobny, ale symulowano strzelanie z lufy o znacznym stopniu zużycia.

Podczas badań stosowano dwie wersje nabojów: A i C, różniących się budową pocisku. Wersja A przeznaczona była do symulacji badań materiału, gdy strzelanie prowadzone jest z lufy niezużytej, zaś wersja C do strzelania z lufy zużytej. Wersja C różniła się od wersji A tym, że pocisk w tej wersji miał pomniejszoną przednią średnicę prowadzącą sabotu. Dzięki zmniejszeniu średnicy pocisku, występował luz między ścianką lufy a pociskiem. Występowanie tego luzu sprawia, że pocisk podczas strzału ma zarówno ruch postępowy, jak i wahadłowy. Występowanie ruchu wahadłowego pocisku symuluje strzelanie z lufy zużytej. Budowę naboju badawczego przedstawiono na rys. 3.

Oceny wytrzymałości pocisku dokonywano na podstawie analizy zdjęć wylotu pocisku z lufy podczas strzału, rejestrowanych za pomocą ultraszybką kamerą. Dla oceny stabilizacji pocisku, na torze lotu ustawiono tarcze z kartonów w odległościach: 20 m, 40 m, 60 m oraz 85 m od wylotu z lufy. Poprawność stabilizacji oceniano na podstawie analizy kształtu przestrzelin.

Podczas badania oddano 10 strzałów: 5 z rdzeniem wykonanym z materiału produkcji francuskiej oraz 5 z rdzeniem wykonanym z materiału rdzenia wykonanego w ZSC MESKO S.A. Wartości ciśnień gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej rejestrowano za pomocą czujników metodą PIEZO, zaś prędkość początkową pocisku rejestrowano metodą Dopplera za pomocą aparatury Weibla. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 3.

Badanie wpływu zużycia lufy na wytrzymałość rdzenia przeprowadzono oddając 5 strzałów pociskami z rdzeniem produkcji Politechniki Warszawskiej. Materiał zastoso-

moment when the stresses in its critical cross-section approach the values existing in the critical cross-section of the service projectile.

In the second case the aim of testing was similar, but the shooting from the barrel with a significant level of wearing was simulated.

Two options of cartridges were used during the tests: A and C, with different structures of projectiles. Option A was designed to simulate the tests of material when an unworn barrel is used, and option C to simulate firing with a worn barrel. Option C distinguishes from option A by its lower frontal guiding diameter of the sabot. Due to reduction of diameter a clearance has appeared between the barrel wall and the projectile. The appearance of this play makes the projectile during the firing have both the advance and swinging motion. Appearance of the swinging move simulates the firing from a worn barrel. The design of the testing projectile is shown in Fig. 3.

The strength of the projectile was evaluated by analysing the pictures of projectiles leaving the muzzle, recorded by the high speed camera. The cardboard targets were placed along the trajectory at distances: 20 m, 40 m, 60 m and 85 m from the muzzle to assess the flight stability. The stability was assessed by analysing the shapes of shot holes.

During the testing 10 shots were fired: 5 with the penetrator made from the material of French origin and 5 with the penetrator made by ZSC MESKO S.A. The values of powder gas pressure behind the projectile were recorded by piezo-sensors, and projectile muzzle velocity was recorded by Doppler method on Weibel instruments. Received results of measurements are presented in table 3.

The influence of barrel wearing into the strength of the penetrator was tested by firing 5 shots with the projectiles having the penetrators produced by the Warsaw University of Technology. The applied material, manufactured by the University,

wany na rdzeń był produkcji PW, przekuty bez wad o dobrych parametrach wytrzymałościowych:

$$R_m = 1300 - 1400 \text{ [MPa]}$$

$$U = 110 - 150 \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

Rejestrowano ciśnienie gazów w komorze naboju (środek łuski) oraz prędkość pocisku i stabilizację na torze lotu. Tarcze kartonowe ustawione były w odległościach: 10 m, 40 m, 60 m i 80 m.

Wylot pocisku z lufy i na początkowym odcinku toru lotu fotografowano kamerą do szybkich zdjęć.

was after swaging, without defects, and with good strength parameters:

$$R_m = 1300 - 1400 \text{ [MPa]}$$

$$U = 110 - 150 \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

The pressure of gases in the cartridge chamber (inside the case) was recorded together with the stabilisation on the flight path. The cardboard targets were put at distances: 10 m, 40 m, 60 m and 80 m.

The projectile leaving the muzzle and at the initial flight path was pictured by the high speed camera.

Tabela 3. Wyniki obliczeń naprężeń zredukowanych występujących w przekroju krytycznym rdzenia

Table 3. Results of calculations for reduced stresses existing in penetrator's critical cross-section

Nr strzału <i>No. of shot</i>	Nr pocisku <i>No. of projectile</i>	Masa pocisku <i>Mass of projectile</i>	Ciśnienie maksymalne <i>Maximal pressure</i>	Naprężenie zredukowane <i>Reduced stress</i>	Materiał rdzenia <i>Material of penetrator</i>	Uwagi <i>Notes</i>
		[g]	[MPa]	[MPa]		
1	14a	271,92	449,7	1215	Politechnika Warszawska Warsaw University of Technology	
2	14b	272,14	471,4	1272		
3	14c	271,69	490,8	1327		
4	14d	272,63	502,0	1353		
5	14e	272,67	474,6	1283		Uszkodzenie rdzenia <i>Break of penetrator</i>
6	15a	272,66	441,6	1194	Zagraniczny (Francja) From abroad (France)	
7	15b	272,92	499,5	1345		
8	15c	273,53	504,1	1355		
9	15d	272,96	501,3	1350		
10	15e	273,19	497,4	1338		

Za wynik pozytywny uznawano taki strzał, w którym:

- podczas strzału nie nastąpiło uszkodzenie ubrzechwionego rdzenia w lufie tzn. nie nastąpiło urwanie rdzenia w przekroju krytycznym,
- kształt przestrzelin na kartonach kontrolnych odpowiada rzutowi ubrzechwionego rdzenia na płaszczyznę prostopadłą do osi rdzenia,
- wartość ciśnienia maksymalnego gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej była równa lub przewyższała wartość obliczeniową niezbędną dla uzyskania założonych naprężeń.

The shot was qualified as a positive result when:

- During the shot the finned penetrator is not damaged in the barrel, i.e. the penetrator is not broken in the critical cross-section,
- Shapes of holes left in controlling cardboards correspond to projection of the finned penetrator into a plane which is vertical to its axis,
- The values of maximal pressure for powder gases behind the projectile were equal or higher than the calculating value needed for receiving the assumed stresses.

Za wynik negatywny uznaje się taki strzał, w którym:

- nastąpiło urwanie rdzenia w przekroju krytycznym podczas ruchu pocisku w lufie,
- nastąpiło uszkodzenie rdzenia, mimo że opuścił on w całości przewód lufy np. jego skrzywienie, co potwierdza się nieprawidłowym kształtem przestrzelin na kartonach kontrolnych,
- wartość ciśnienia maksymalnego gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej była mniejsza niż wartość obliczeniowa niezbędna dla uzyskania założonych naprężeń.

The shot was qualified as a negative result when:

- The penetrator was broken in the critical cross-section at moving in the barrel,
- The penetrator was damaged, even if it left the muzzle as a one piece, by e.g. its bending what was confirmed in incorrect shapes of holes left in controlling cardboards,
- The value of powder gases maximal pressure behind the projectile was lower than the calculating value required for the assumed stresses.

Tabela 4. Wyniki obliczeń naprężeń zredukowanych występujących w przekroju krytycznym rdzenia

Table 4. Results of calculations for reduced stresses existing in penetrator's critical cross-section

Nr strzału <i>No. of shot</i>	Nr Pocisku <i>No. of projectile</i>	Masa pocisku [g] <i>Mass of projectile</i>	Ciśnienie maksymalne [MPa] <i>Maximal pressure</i>	Naprężenie zredukowane [MPa] <i>Reduced stress</i>	Producent materiału rdzenia <i>Material of penetrator produced by</i>	Stabilizacja <i>Stabilisation</i>
1	16	272,1	503,7	1360	PW/MESKO	Dobra/ OK
2	17	272,67	490	1321	PW/MESKO	dobra
3	18	272,33	496,1	1338	PW/MESKO	dobra
4	19	272,12	492	1328	PW/MESKO	dobra



Fot. 3. Zdjęcie pocisku badawczego na torze lotu zrobione za pomocą ultraszybkiej kamery

Photo 3. Picture of the testing projectile on the flying path taken by high speed camera

Na podstawie badań stwierdzono, że wszystkie pociski w całości opuściły lufę i nie uległy uszkodzeniu na początkowym torze lotu. Wyniki pomiarów z badań oraz obliczenie naprężeń zredukowanych występujących w przekrojach krytycznych rdzeni przedstawiono w tabelach 4 i 5.

On the basis of the tests it was stated that all projectiles left the barrel as one piece and were not damaged at the initial trajectory. Results of measurements during testing and calculation of reduced stresses existing in the critical cross-sections of the penetrators are presented in tables 4 and 5.

Tabela 5. Porównawcze wyniki obliczeń naprężeń w przekroju krytycznym rdzenia pocisku badawczego i 120mm pocisku APFSDS-T konstrukcji WITU Zielonka

L.p.	Parametr	Miano	*Badawczy PW/MESKO	WITU Zielonka	WITU Zielonka
				wg dokum. konstrukcyjnej	wg badań temp. ład. + 50°C
1	Kaliber pocisku - d	mm	30	120	120,0
2	Masa pocisku wersja podst.	g	272,63	6 940,00	6 940,0
3	Masa dodana (obciążniki)	g	0	0	0
4	Masa pocisku po dociążeniu	g	272,63	6 940	6 940
5	Masa ubrzechwionego rdzenia po dociążeniu		128,28	6 940	6 940
6	Masa rdzenia poniżej przekroju krytycznego	g	41,86	826,00	826,00
7	Średnica w przekroju krytycznym rdzenia	mm	<u>6,40</u>	<u>22,10</u>	<u>22,10</u>
	Ciśnienie maks. gazów proch.	MPa	<u>496,1</u>	<u>500</u>	<u>535</u>
9	Masa ładunku miotającego	g	173,5	7 200	7 200,0
0	Współcz. fikcyjności masy	—	1,25	1,39	1,4
11	Przyśpieszenie pocisku	m/s ²	1 027 248	587 972	629 769
12	Siła bezwładności masy rdzenia poniżej przekroju niebezpiecznego	N	27 041	293 866,3	314 428,9
13	Naprężenie wzdłużne	MPa	841	766	820
14	Naprężenie promieniowe I	MPa	-496,1	-500	-535
15	Naprężenie promieniowe II	MPa	-496,1	-500	-535
16	Naprężenia zredukowane	MPa	<u>1 337</u>	<u>1 266</u>	<u>1 350</u>

*Materiał wspólny wypiekany w dwóch piecach w Laboratorium Stopów Ciężkich PW i w Zakładzie Stopów Twardych MESKO

Table 5. Comparative results of calculations of stresses in the penetrator critical cross-section for the testing projectile and 120mm APFSDS-T projectile developed by MIAT, Zielonka

No.	Parameter	Dimen- sions	*Testing PW/MESKO	MIAT Zielonka	MIAT Zielonka
				Acc. to designing documentation	Acc. to tests at charge temp. +50°C
1	Projectile calibre - d	mm	30	120	120.0
2	Projectile mass – basic option	g	272.63	6 940.00	6 940.0
3	Added mass (weights)	g	0	0	0
4	Mass of projectile after mass adding	g	272.63	6 940	6 940
5	Mass of finned penetrator after mass adding	g	128.28	6 940	6 940
6	Penetrator's mass below critical cross-section	g	41.86	826.00	826.00
7	Diameter at penetrator's critical cross-section	mm	<u>6.40</u>	<u>22.10</u>	<u>22.10</u>
8	Max. pressure of powder gases	MPa	<u>496.1</u>	<u>500</u>	<u>535</u>
9	Mass of propelling charge	g	173.5	7 200	7 200,0
10	Coefficient of mass fictitiousness	—	1.25	1.39	1.4
11	Acceleration of projectile	m/s ²	1 027 248	587 972	629 769
12	Inertial force of penetrator's mass below critical cross-section	N	27 041	293 866,3	314 428,9
13	Axial stress	MPa	841	766	820
14	Radial stress I	MPa	-496.1	-500	-535
15	Radial stress II	MPa	-496.1	-500	-535
16	Reduced stress	MPa	<u>1 337</u>	<u>1 266</u>	<u>1 350</u>

*Material prepared by two sides and baked in two furnaces at the Laboratory of Heavy Alloys of the Warsaw University of Technology and the Institution of Hard Alloys of MESKO

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy rezultatów obliczeń, dotyczących badania należy stwierdzić, że istnieje możliwość zbudowania stanowiska do przeprowadzania badań tych stopów w warunkach dynamicznych. Metoda zaproponowana w niniejszym opracowaniu pozwala stwierdzić, czy parametry wytrzymałościowe wytwarzanego materiału oraz jego własności użytkowe spełniają wymagania dotyczące niezawodności i bezpieczeństwa produkowanej amunicji.

Dzięki zastosowaniu do budowy stano-

5. Summary

On the ground of the analysis of results of calculations relating to testing it may be stated that a setup for testing tungsten heavy alloys in dynamic conditions can be built. The method proposed in the paper can be used to decide if the strength parameters of produced material and its functional characteristics meet the requirements concerning dependability and safety of manufactured ammunition.

Application of existing or produced parts and components for building both

wiska badawczego, jak i pocisku, części i elementów już istniejących bądź produkowanych zostanie skrócony czas trwania badań, a ich koszty zostaną obniżony.

Na podstawie analizy wyników obliczeń wytrzymałościowych należy stwierdzić, że stosowane dotychczas metody odbioru materiału na rdzenie pocisków podkalibrowych są niekompletne i obciążone dużym błędem. Podstawą odbioru materiału na rdzeń jest bowiem spełnienie wymagań wytrzymałościowych postawionych przez konstruktora pocisku.

Wymagania te dotyczą parametrów wyznaczonych w warunkach statycznych obciążeń materiału. W rzeczywistych warunkach strzału, materiał rdzenia poddawany jest bardzo silnym obciążeniom dynamicznym. W tych warunkach naprężenia w poszczególnych przekrojach przekraczają wartości dopuszczalne dla zastosowanego materiału. Dobitnym tego przykładem są obliczenia wykonane w ramach tej pracy, a dotyczące naprężeń w przekroju niebezpiecznym rdzenia 120 mm pocisku typu APFSDS-T konstrukcji WITU Zielonka.

Podana w dokumentacji konstrukcyjnej wartość obliczeniowa ciśnienia maksymalnego gazów prochowych wynosiła $p_m = 500$ MPa. Z analizy obliczeń wynika, że jedynie dla obliczeniowej wartości ciśnienia gazów prochowych, naprężenia w przekroju niebezpiecznym nie przekroczyły wytrzymałości na rozciąganie dla materiału rdzenia i wyniosły $\sigma_{red} = 1266$ MPa.

Z danych uzyskanych w poligonowych próbach strzelaniem, gdy prochowy ładunek miotający był podgrzany do temperatury $+50^{\circ}\text{C}$ ciśnienia gazów prochowych wynosiły odpowiednio: $p_m = 535$ MPa i $p_m = 653$ MPa, a odpowiadające im naprężenia zredukowane: $\sigma_{red} = 1350$ MPa i $\sigma_{red} = 1654$ MPa, co wskazuje na przekroczenie w obu przypadkach wytrzymałości na rozciąganie $R_m \geq 1300$ MPa.

Pomimo przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie rdzeń nie uległ uszkodzeniu. Świadczy to o tym, że w warunkach obciążeń dynamicznych, wytrzymałość na rozciąganie materiału rdzenia jest znacząco wyższa niż

the testing setup and the projectile reduces the time of testing and its costs.

Analysis of strength calculation results indicates that currently used methods of acceptance to materials designed for penetrators of kinetic projectiles are incomplete and burdened by a great error. It is so as the acceptance of the material designed to the penetrator is based on the meeting of the strength specifications prepared by the designer of the projectile.

These requirements refer to the parameters identified at static conditions of material loads. In the real conditions of shooting the material of the penetrator is subjected to very strong dynamical loads. In such conditions the stresses in particular cross-sections exceed the values permissible for the applied material. A good illustration of it are calculations carried out in the present work for the stresses in critical cross-section of 120 mm penetrator of APFSDS-T projectile developed by MIAT, Zielonka.

The calculating value of maximal pressure for powder gases in the designing documentation was $p_m = 500$ MPa. The analysis of calculations indicates that only for the calculating value of powder gases pressure the stresses in the critical cross-section have not exceeded the tensile strength for the penetrator's material equal to $\sigma_{red} = 1266$ MPa.

Data received at range firing trials, when the powder charge is preheated to $+50^{\circ}\text{C}$, indicates that the powder gases pressures were respectively: $p_m = 535$ MPa and $p_m = 653$ MPa, and the reduced stresses corresponding them were: $\sigma_{red} = 1350$ MPa and $\sigma_{red} = 1654$ MPa, what shows that in both cases the tensile strength of $R_m \geq 1300$ MPa was exceeded.

Despite the excessive tensile strength the penetrator was not broken. It proves that in conditions of dynamical loads the tensile strength of penetrator material is significantly greater than received and accepted at the strength calculations in static conditions. This fact can be confirmed by the results of investigations

uzyskana i przyjęta w obliczeniach wytrzymałość w warunkach statycznych. Potwierdzeniem tej tezy są wyniki badań autora niniejszego opracowania przeprowadzone w Zakładzie Mechaniki i Technik Uzbrojenia PW nad wyznaczaniem dynamicznej granicy plastyczności metodą dynamicznego testu Taylora dla wolframowych stopów ciężkich.

Badania te wykazały, że w warunkach silnych obciążeń dynamicznych wartość dynamicznej granicy plastyczności może być 2÷3 razy większa niż dla warunków statycznych.

Biorąc pod uwagę wymienione powyżej czynniki, dla uzyskania w procesie produkcji materiału z WSC o właściwych parametrach, konieczne jest stosowanie dynamicznych metod sprawdzających ich właściwości.

carried out by the author of the present paper working in the Institution of Mechanics and Armament Technologies at the Warsaw University of Technology on the identification of the dynamical limit of plasticity by the method of Taylor's dynamic test for tungsten heavy alloys.

These investigations proved that in conditions of strong dynamical loads the value of the dynamic limit of plasticity may be 2÷3 times greater than in static conditions.

Considering the above the dynamic methods for properties checking have to be applied to produce from the WHAs the material with desired parameters.

Literatura / Literature

- Cybula, L., Kaczorowski, M., Nita Z., Rafalski M. (2017). *Analiza dokumentacji konstrukcyjnej 120 mm naboju z pociskiem APFSDS-T pod kątem wymagań stawianych materiałow do wykonania rdzeni pocisków podkalibrowych*. Sprawozdanie z pracy nr DOB-IO8/05/01/2016. Warszawa: WITU.
- Groenenboom, P., Kasala, J. (1996). Virtual Predictive Testing of Weapons, Amunition and Armour Systems. Conference on New Technologies and Materials in Production of Defence Weapons and Amunition, 3-4 October 1996, Trencin, Slovak Republic.
- Praca zbiorowa. (2019). *Opracowanie i wykonanie demonstratorów technologii krytycznych elementów do nowej generacji amunicji czolgowej 120 mm, pk. „B I Z M U T”*, Sprawozdanie z umowy nr DOB-BIO8/05/01/2016. Warszawa: WITU.
- Rosenberg, Z., Dekel, E. (2001). Material Similarities in Long-rod Penetration Mechanics. *International Journal of Impact Engineering*, 25(4), 361-372. doi: 10.1016/S0734-743X(00)00052-X.
- Serebrjakov, M. (1962). *Vnutrennaja ballistyka stvolnych sistem i porochowych raket*. Moskwa.
- Zukas, J.A. (eds.). (1990). *High Velocity Impact Dynamics*, New York: John Wiley & Sons, Inc.

