



## **ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU KONSTRUKCJI SABOTU POCISKU PODKALIBROWEGO NA GŁĘBOKOŚĆ PRZEBICIA PANCERZA. CZEŚĆ I – ANALIZA WARIANTU PODSTAWOWEGO POCISKU**

### ***NUMERICAL ANALYSIS OF KINETIC ENERGY PROJECTILE SABOT STRUCTURE INFLUENCING THE ARMOUR PENETRATION DEPTH. PART I - PROJECTILE BASIC OPTION***

Tomasz BŁASZCZAK, Mariusz MAGIER

Zakład Mechaniki i Techniki Uzbrojenia, Instytut Mechaniki i Poligrafii,  
Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska,  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

*Department of Mechanics and Armament Technologies, Institute of Mechanics and Printings,  
Faculty of Production Engineering, Warsaw University of Technology,  
85 Narbutta St., 02-524 Warsaw, Poland*

*Author's e-mail address: mariusz.magier@pw.edu.pl; ORCID: 0000-0002-4431-9537*

DOI 10.5604/01.3001.0014.8998

**Streszczenie:** W ramach pracy wykonano analizę numeryczną wpływu konstrukcji sabotu pocisku podkalibrowego na głębokość przebicia pancerza. Analiza ujawniła m.in. obszary konstrukcji sabotu, w których możliwa jest optymalizacja kształtu oraz wpływ różnych materiałów sabotu na parametry bojowe pocisku. Analizę przeprowadzono przy użyciu metody elementów skończonych w środowisku Solidworks Simulation. Pozwoliło to na zbadanie stanu dynamicznych obciążeń jakim jest poddawany sabot w momencie strzału. Zbadano wpływ zastosowania różnych materiałów sabotu oraz modyfikacji geometrii pocisku na wytrzymałość połączenia penetrator - sabot. Przeprowadzono symulację rozkładu obciążeń dynamicznych w połączeniu penetrator - sabot oraz jego wizualizację. Dla wybranych wariantów konstrukcji przeprowadzono obliczenia z zakresu balistyki końcowej. Pozwoliło to na określenie potencjalnych kierunków rozwoju tego typu amunicji.

**Słowa kluczowe:** pocisk kinetyczny, penetracja, symulacje numeryczne

**Abstract:** A numerical analysis over influence of kinetic energy projectile sabot structure on the armour depth penetration is presented in the paper. The analysis has identified an influence of sabot different materials into projectile combat performance, and some areas of sabot structure where its shape can be optimised. The finite element method in Solidworks Simulation environment was used in analysis. Due to it the dynamical loads of the sabot at the time of firing could be investigated. The influence of sabot different materials and projectile geometry modifications on the strength of penetrator - sabot joining was studied. A pattern of dynamical loads for the penetrator - sabot joining was simulated and visualised. For selected options of the structure the calculations were performed over the terminal ballistics. It allowed an identification of potential development trends for this brand of ammunition.

**Keywords:** kinetic projectile, penetration, numerical simulations

## 1. Wprowadzenie

Podstawowym rodzajem amunicji służącym do niszczenia czołgów lub pojazdów opancerzonych są pociski podkalibrowe. Nazwa wywodzi się od elementu przebijającego pancerz, czyli penetratora o średnicy wynoszącej w zaokrągleniu jedną trzecią kalibru lufy. Należą one do grupy pocisków przeciwpancernych o działaniu uderzeniowym tzw. KE (kinetyczne pociski artyleryjskie). Głównym czynnikiem rażącym w tego typu amunicji jest jej energia kinetyczna. W celu maksymalizacji energii penetratora w momencie uderzenia w cel, pociski wystrzeliwane są z dużymi prędkościami początkowymi (1600-1800 m/s) oraz posiadają penetratory o wysokim współczynniku kształtu  $l/d$  (1-długość/d-średnica pręta) wykonane ze spieków ciężkich (spieki wolframowe lub zubożony uran). Dodatkowo pociski charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami aerodynamicznymi. To właśnie energia kinetyczna pocisku w chwili uderzenia w cel odpowiada za zdolność przebicia pancerza [1-6].

Celem publikacji było przedstawienie analizy numerycznej wpływu konstrukcji sabotu 120 mm pocisku podkalibrowego na głębokość przebicia pancerza. Konstrukcja pocisku w założeniu miała odpowiadać przyjętym współcześnie wymogom technicznym, lecz równocześnie zminimalizować masę sabotu. Takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwoliło zwiększyć prędkość początkową.

Realizacja zadania obejmowała przegląd rozwiązań dostępnych już na rynku oraz zdefiniowanie wymagań stawianych przed nowoczesnymi pociskami podkalibrowymi. W dalszej części przeanalizowano konstrukcje wybranych współczesnych 120 mm pocisków typu APFSDS-T w porównaniu z 120 mm pociskami tego typu będącymi w uzbrojeniu Wojska Polskiego. Kolejnymi etapami były obliczenia wytrzymałościowe pocisku z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych.

## 1. Introduction

Kinetic energy projectiles are the main type of ammunition used for fighting the tanks or armour clad vehicles. The name originates from a component piercing the armour in the form of a penetrator having the diameter of ca. one third of the barrel calibre. They belong to the category of impacting antitank projectiles using the kinetic energy (KE). Kinetic energy of this ammunition is the main striking factor. In order to maximise the penetrator's energy at hitting a target the projectiles are fired with high muzzle velocities (1600-1800 m/s), and have a high coefficient of shape  $l/d$  (1-length/d-diameter of rod), and are made of heavy sinters (tungsten sinters or depleted uranium). Additionally the projectiles are characterised by high aerodynamic properties. The kinetic energy of the projectile translates into its armour penetrating capacities [1-6].

The paper presents a numerical analysis of 120 mm kinetic energy projectile sabot design influencing the armour penetrating depth. It was assumed that the design of the projectile has to minimise the mass of a sabot at satisfying the existing technical specifications. Such design could increase the muzzle velocity.

The task was performed by reviewing the solutions available already on the market and specifying the requirements for modern kinetic energy projectiles. Moreover, some selected modern designs of 120 mm APFSDS-T projectiles were analysed and compared with 120 mm projectiles of that type used by the Polish Armed Forces. Next chapters of the paper include some calculations by the Method of Finite Elements over the projectile strength parameters.

## 2. Analiza konstrukcji wybranych współczesnych 120 mm pocisków typu APFSDS-T w porównaniu do 120 mm pocisków tego typu występujących na uzbrojeniu WP

W tym punkcie przeanalizowano wybranych konstrukcji pocisków podkalibrowych stosowanych w armatach czołgowych kalibru 120 mm w porównaniu do pocisków tego typu stosowanych w WP. Zestawienie ma na celu porównanie istniejących konstrukcji w celu uzyskania danych pomocnych w dalszej analizie. Rozważano pociski tego samego kalibru, co pozwoliło szerzej spojrzeć na kluczowe parametry wykorzystywane podczas projektowania tego typu pocisków. Możemy wyróżnić dwóch wiodących producentów dominujących na rynku uzbrojenia. Poniżej zaprezentowano niektóre z rozwiązań stosowanych przez producentów.

### 2.1. Rodzina niemieckich pocisków DM 33 -DM 63

## 2. Analysis of Selected Present Designs of 120 mm APFSDS-T Projectiles and Comparison to 120 mm Projectiles of This Type Used by the Polish Armed Forces

The chapter analyses some designs of kinetic energy projectiles for 120 mm tank guns and compares them with projectiles of this type used by the Polish Armed Forces. The existing designs are compared to receive data useful for further studies. Projectiles of the same calibre were considered to get a wider perspective of key parameters used at their designing. We can distinguish two main manufacturers dominating on the armament market. Some solutions used by the manufacturers are presented below.

### 2.1. Family of German Projectiles DM 33 -DM 63

Tabela 1. Dane niemieckich pocisków z rodziny DM 33 - DM 63

Table 1. Specifications of German projectiles for family DM 33 - DM 63

Nazwa pocisku / <i>Name of projectile</i>	DM 33	DM 43	DM 53/63
Kaliber / <i>Calibre</i> [mm] / Armata / <i>Gun</i>	120 / L44	120 / L55	120 / L55
Prędkość początkowa / <i>Muzzle velocity</i> [m/s]	1650	1740	1750
Prędkość penetratora w chwili uderzenia w cel w odległości 2000 m / <i>Impact Velocity on distance of 2000 m</i> [m/s]	1530	1640	1640
Masa penetratora / <i>Penetrator's mass</i> [kg]	4	4	5
Średnica penetratora / <i>Penetrator's diameter</i> [mm]	27/30	24/27	24/27
Energia kinetyczna penetratora w chwili uderzenia w cel / <i>Penetrator's kinetic energy at hitting a target</i> [kJ]	4682	5379	6724
Gęstość energetyczna / <i>Energetic density</i> [kJ/mm <sup>2</sup> ]	6,6	7,6	11,7
Zdolność przebicia pancerza RHA w odległości 2000 m / <i>Penetration depth of RHA plate at distance 2000 m</i> [mm]	480 (dane producenta / <i>Manufacturer data</i> )	560 (dane producenta / <i>Manufacturer data</i> )	850 (szacowane / <i>Estimated</i> )

Tabela 1 ukazuje jak zwiększała się przebijalność pocisków firmy Rheinmetall począwszy od lat 70 XX. wieku. Tak duży rozwój był możliwy dzięki rozwojowi technologii produkcji i składu spieków o osnowie wolframowej. Najnowsze pociski podkalibrowe typu APFSDS cechują się wydłużeniem (smukłością)  $l/d > 30$ .

Table 1 shows increase of penetration for Rheinmetall projectiles starting from the 70-ties of 20<sup>th</sup> century. The increase was possible due to developments of production technologies and compositions of tungsten based sinters. The newest kinetic energy projectiles of APFSDS type are characterised by the slenderness  $l/d > 30$ .



**Rys. 1. Widok pięciu generacji penetratorów typu APFSDS opracowanych w latach 1979-2001 [7]**

**Fig. 1. View of five generations of APFSDS penetrators developed within 1979-2001 [7]**

Wydłużenie penetratora przy jednoczesnym zmniejszaniu jego średnicy prowadzi do znaczącego zwiększenia zdolności penetracji pancerza czołgu. Rozwój pocisku w tym aspekcie pozwolił dwukrotnie zwiększyć średnią głębokość penetracji w latach 1979-2001.

Drugim kluczowym aspektem znacząco poprawiającym parametry bojowe pocisków APFSDS było wprowadzenie nowej armaty L/55 120 mm. Jest to unowocześniona wersja armaty L/44 120 mm. Geometria komory nabojej armaty pozostała taka sama, co umożliwiło strzelanie jednakowymi pociskami z ich obu wersji. Jediną różnicą była długość lufy (wzrost z 44 do 55 kalibrów). Dłuższa lufa pozwala osiągnąć wyż-

Elongation of the penetrator both with reduction of its diameter provides a significant increase of penetrating capacities of tank armours. Due to projectile's developments in this aspect the mean depth of penetration was increased two times within the years 1979-2001.

Introduction of a new L/55 120 mm gun was a second key aspect which significantly improved the combat performance of APFSDS projectiles. The geometry of the cartridge chamber has remained unchanged and the same projectiles could be fired with its two options. The length of the barrel (increase from 44 to 55 calibres) was the only difference. The longer barrel provides muzzle velocities of projectiles higher by

sze prędkości początkowe pocisku o ponad 100 m/s.

Niemieckie pociski składały się z trzyczęściowego aluminiowego sabotu oraz dwuczęściowego wolframowego penetratora.

Dalszy rozwój pocisków (z DM 53A1 na DM63) polegał na wprowadzeniu nowego ładunku prochowego. Ładunki te zapewniają prawidłowe działanie pocisku w zakresie temperatur od -47°C do 71°C. Umożliwia to wykorzystanie jednego rodzaju pocisków niezależnie od klimatu.

## 2.2. Amerykańskie pociski M 829

Tabela 2. Dane amerykańskich pocisków z rodziny M 829

Table 2. Specifications of the US projectiles for family M 829

Nazwa pocisku / <i>Name of projectile</i>	M 829	M 829A1	M 829A2	M 829A3
Kaliber / <i>Calibre</i> [mm] / Armata / <i>Gun</i>	120 / M256	120 / M256	120 / M256	120 / M256
Prędkość początkowa / <i>Muzzle velocity</i> [m/s]	1670	1560	1680	1555
Prędkość penetratora w chwili uderzenia w cel w odległości 2000 m / <i>Impact Velocity on distance of 2000 m</i> [m/s]	1560	1460	1580	1455
Masa penetratora / <i>Penetrator's mass</i> [kg]	4	4,6	4,6	10
Średnica penetratora / <i>Penetrator's diameter</i> [mm]	26/29	22/25	22/25	25
Energia kinetyczna penetratora w chwili uderzenia w cel / <i>Penetrator's kinetic energy at hitting a target</i> [kJ]	4867	4902	5741	10585
Gęstość energetyczna / <i>Energetic density</i> [kJ/mm <sup>2</sup> ]	6,6	7,6	11,7	18,5
Zdolność przebicia pancerza RHA w odległości 2000 m / <i>Penetration depth of RHA plate at distance 2000 m</i> [mm]	480 (dane producenta / <i>Manufacturer data</i> ))	560 (dane producenta / <i>Manufacturer data</i> ))	850 (szacowane / <i>Estimated</i> )	b/d <i>No data</i>

Stany Zjednoczone opracowały własny pocisk podkalibrowy typu APFSDS. Pierwsza wersja pocisku otrzymała nazwę M829. Amerykańskie pociski różnią się w stosunku do

more than 100 m/s.

Projectiles produced in Germany consisted of a sabot made of three parts and a tungsten penetrator made of two parts.

Next stage of projectile development (from DM 53A1 to DM63) was based on introduction of a new powder charge. These charges provide proper operation of projectile within the range of temperatures from -47°C to 71°C. It makes one type of projectiles can be used independently on the climatic conditions.

## 2.2. American Projectiles M 829

The US has developed own kinetic energy projectile of APFSDS type. The first version of the projectile was named as M829. The American projectiles differ from Ger-

niemieckich zastosowaniem penetratora wykonanego zubożonego uranu.

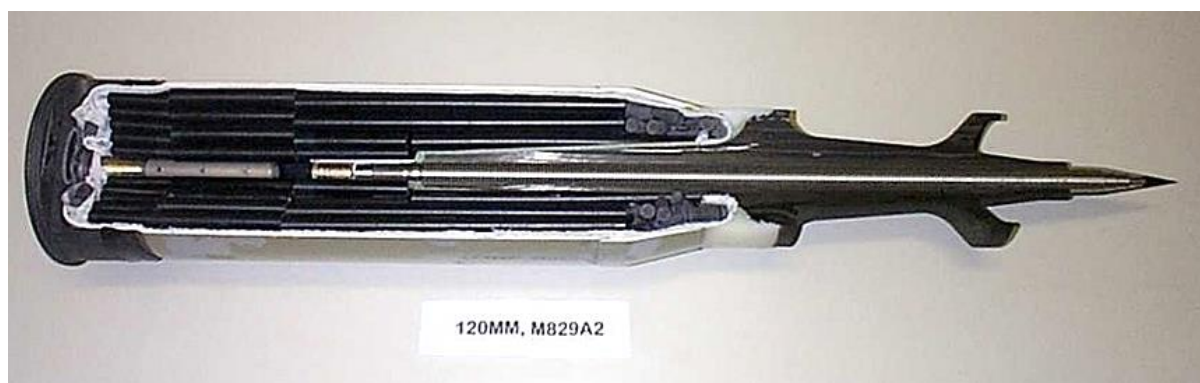
Kolejnym, rozwojowym modelem był M829A1, tzw. „Silver Bullet”. Nazwę tę nadano mu po uzyskaniu dobrych wyników bojowych podczas wojny w Zatoce wobec irackich T-55, T-62 i T-72. W wersji M 829 i M 829A1 sabot był trzyczęściowy zbudowany z aluminium.

W 1998 roku Stany Zjednoczone wprowadziły M829A2. Nowy pocisk posiadał ulepszony uranowy rdzeń oraz kompozytowy sabot. Redukcja masy sabotu pozwoliła uzyskać zdecydowanie wyższą przebijałość.

man counterparts by application of depleted uranium for penetrators.

„Silver Bullet” M829A1 was a next developing model. It started to become known under this name after high combat performance at the war in the Persian Gulf against Iraqis T-55, T-62 and T-72. In versions of M 829 and M 829A1 the sabot was made of aluminium and consisted of three parts.

In 1998 the US implemented M829A2. The new projectile had an improved uranium core and a composite sabot. Reduced mass of the sabot provided significantly higher penetration.



**Rys. 2. Pocisk M829A2 z wyszczególnionymi częściami składowymi [7]**

*Fig. 2. Projectile M829A2 with specified components [7]*



**Rys. 3. Pocisk M829 A3 - przekrój [8]**

*Fig. 3. Projectile M829 A3 – cross section [8]*

W 2002 roku rozpoczęto produkcję M829A3 stosując lżejszy sabot formowany wtryskowo, dłuższy (800 mm) i znacznie cięższy penetrator zubożonego uranu oraz bardziej efektywny proch (RPD-380). Penetrator składa się z dwóch części, z których jedna ma końcówkę stalową o długości oko-

In 2002 the production of M829A3 started with a lighter sabot formed by injection moulding, and a longer (800 mm) and much heavier penetrator made of depleted uranium, and more efficient powder (RPD-380). The penetrator consists of two parts, one of them having a steel tip that is ca. 100

ło 100 mm, a druga składa się z uranu zubożonego. Średnica penetratora została również zwiększona z 22 do 25 mm. Stalowa część penetratora służy do pokonania pancerza ERA, a druga część penetratora wykonana z zubożonego uranu do penetracji pasywnego pancerza pojazdu. Pocisk powstał z przeznaczeniem skutecznego niszczenia rosyjskiego pancerza reaktywnego Kontakt-5.

### 2. 3. Niemiecko - amerykańskie pociski KE-W

mm long and the second one is made of depleted uranium. Diameter of the penetrator was increased from 22 to 25 mm. The part of penetrator made of steel is designed to fight the ERA, whereas the second part made of depleted uranium is designed to penetrate a passive armour of vehicles. The projectile was made for effective fighting the Russian reactive armour Kontakt-5.

### 2.3. KE-W Projectiles of German-American Origin

Tabela 3. Dane niemiecko-amerykańskich pocisków z rodziny KE-W

Table 3. Specifications of the US-German projectiles for family KE-W

Nazwa pocisku / <i>Name of projectile</i>	KE-W A1	KE-W A2
Kaliber / <i>Calibre</i> [mm] / Armata / <i>Gun</i>	120 / M256	120 / M256
Prędkość początkowa / <i>Muzzle velocity</i> [m/s]	1740	1700
Prędkość penetratora w chwili uderzenia w cel w odległości 2000 m / <i>Impact Velocity on distance of 2000 m</i> [m/s]	1640	1600
Masa penetratora / <i>Penetrator's mass</i> [kg]	4	7,6
Średnica penetratora / <i>Penetrator's diameter</i> [mm]	22	22
Energia kinetyczna penetratora w chwili uderzenia w cel / <i>Penetrator's kinetic energy at hitting a target</i> [kJ]	5379	9728
Gęstość energetyczna / <i>Energetic density</i> [kJ/mm <sup>2</sup> ]	10,9	19,8
Zdolność przebicia pancerza RHA w odległości 2000 m / <i>Penetration depth of RHA plate at distance 2000 m</i> [mm]	b/d <i>No data</i>	b/d <i>No data</i>

Pocisk KE-W A1 120 mm został opracowany przez General Dynamics Ordnance and Tactical Systems jako alternatywa dla pocisków z zubożonego uranu, stosowanych przez armię Stanów Zjednoczonych. Posiada wolframowy penetrator. Pocisk ten został zakwalifikowany przez rząd niemiecki i otrzymał także certyfikat bezpieczeństwa (w roku 2000) wydany przez rząd USA, jako w pełni kompatybilny z M1A1, M1A2 i Leopard II (MBT).

Pocisk KEW-A2 120 mm został opracowany na bazie pocisku M829 A2. Podobnie jak amerykański pocisk posiada analogiczny kompozytowy sabot, natomiast rdzeń został wyko-

120 mm KE-W A1 projectile was developed by General Dynamics Ordnance and Tactical Systems as an alternative for projectiles made of depleted uranium used by the US army. It has a tungsten penetrator. The projectile was qualified by the German authorities and also received the certificate of safety (in 2000) issued by the US authorities as fully compatible with M1A1, M1A2 and Leopard II (MBT).

120 mm KEW-A2 projectile was developed on the base of M829 A2 projectile. It has a composite sabot like the US projectile but the core was made of sintered tungsten.

nany ze spieków wolframowych. Nabój KEW-A2 otrzymał certyfikat bezpieczeństwa wydany przez rząd USA we wrześniu 2003 roku.

#### **2.4. 120 mm pociski typu APFSDS-T występujące na uzbrojeniu WP**

Pociskami występującymi na uzbrojeniu WP są niemiecki DM 33A1 oraz polski PZ 531 zaprojektowany przez WITU we współpracy z MESKO S.A. Polska konstrukcja charakteryzuje się penetratorem o budowie segmentowej. Teoretyczne założenia konstrukcji polegały na zachowaniu wzajemnego liniowego położenia segmentów penetratora względem punktu uderzenia w pancerz. Zachowanie takiego położenia miało na celu wniknięcie elementów penetratora jeden za drugim. Powyższy sposób dostarczania energii kinetycznej pozwala zmniejszyć straty energii związane z inercyjnym hamowaniem penetratora w materiale pancerza. Przekłada się to na większą głębokość przebiccia pancerza w porównaniu do jednorodnego penetratora przez penetrator segmentowy o tych samych gabarytach i masie [9].

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz symulacji, dopiero przy prędkości powyżej 2000 m/s dochodzi do zwiększania głębokości penetracji. Jest to wzrost o około 10% dla penetratorów segmentowych w stosunku do penetratorów jednorodnych o tej samej masie i gabarytach. Penetratory segmentowe są narażone na działanie bardzo wysokich obciążeń w momencie strzału. Wymagania wytrzymałościowe są szczególnie trudne do spełnienia dla penetratorów pocisków do armat czołgowych. W konstrukcji pocisku WITU, mając na uwadze ograniczenia dotyczące wytrzymałości pocisku w momencie strzału, zastosowano penetrator składający się z dwóch segmentów. Wykonane zostały ze spieku na osnowie wolframowej, a do połączenia segmentów użyto tulei wykonanej z materiału o wysokiej wytrzymałości. Wybór oraz zastosowanie powyższego rozwiązania konstrukcyjnego ma na celu nie tylko zwiększyć zdolność przebiccia

KEW-A2 cartridge received the certificate of safety issued by the US authorities in September, 2003.

#### **2.4.120 mm Projectiles of APFSDS-T Type on Inventory of Polish Army**

The Polish Army uses DM 33A1 projectiles of German origin and the Polish PZ 531 designed by MIAT (Military Institute of Armament Technology) in cooperation with MESKO S.A. The Polish design has a two-segmented penetrator. Theoretical assumptions of the design required the mutual linear position of penetrator segments against the point of impact into the armour to be maintained. The maintaining of such locations was aimed to provide the elements of the penetrator follow each other. The above mentioned method of delivering the kinetic energy reduces the losses of energy connected with the inertial arresting of the penetrator in the material of armour. It translates into greater depth of armour penetration by the segmented penetrator than a homogeneous penetrator of the same size and mass [9].

The performed simulations and tests indicate that only for velocities above 2000 m/s the depth of penetration increases. The increase is ca. 10% for the segmented penetrators referring to homogeneous penetrators of the same mass and size. Segmented penetrators are exposed to very high loads at firing. Strength specifications are extremely difficult to be met for penetrators used in projectiles of tank guns. Considering the limitations regarding the strength of the projectile at firing the MIAT's design implements a two segmented penetrator. They were made of sintered tungsten and a sleeve connecting these segments was made of high strength material. The choice and application of the above design is aimed not only to increase the penetrating capacities of homogeneous armours



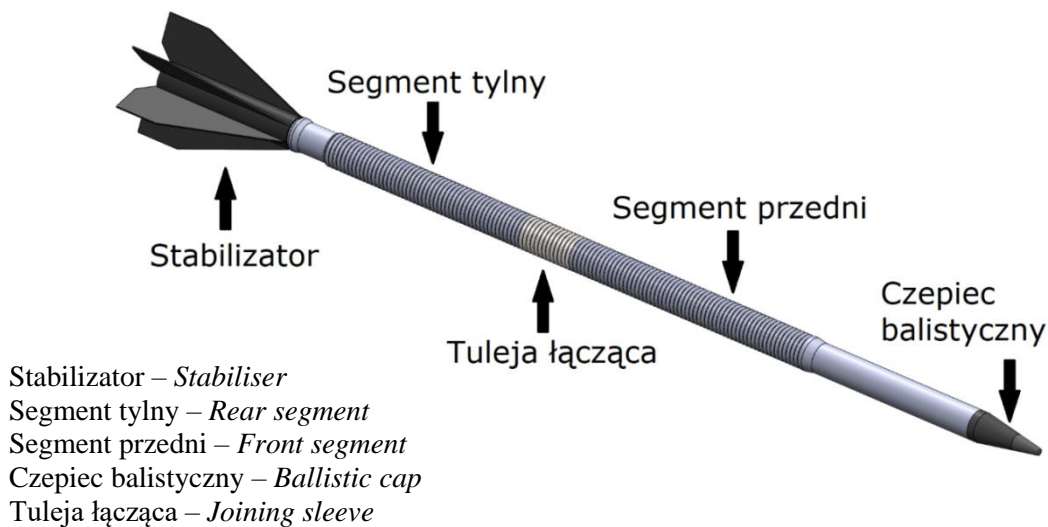
pancerza jednorodnego, ale również zwiększyć zdolność przebicia pancerza niejednorodnego, w którego skład wchodzi stalowe płyty oraz elementy ceramiczne.

but to enhance the penetration of inhomogeneous armours, comprising steel plates and ceramic components, as well.

Tabela 4. Dane pocisków APFSDS-T występujących w uzbrojeniu WP [10]

Table 4. Specifications of APFSDS-T projectiles on inventory of the Polish Army [10]

Nazwa pocisku / Name of projectile	DM 33A1	PZ 531
Kaliber /Calibre [mm] / Armata / Gun	120 / L44	120 / L44
Prędkość początkowa / Muzzle velocity [m/s]	1650	1650
Prędkość penetratora w chwili uderzenia w cel w odległości 2000 m / Impact Velocity on distance of 2000 m [m/s]	1530	1530 (szacowane / estimated)
Masa penetratora / Penetrator's mass [kg]	4,6	3,7
Średnica penetratora / Penetrator's diameter [mm]	28	24
Energia kinetyczna penetratora w chwili uderzenia w cel / Penetrator's kinetic energy at hitting a target [kJ]	5384	4330
Gęstość energetyczna / Energetic density [kJ/mm <sup>2</sup> ]	7,6	8,2
Zdolność przebicia pancerza RHA w odległości 2000 m pod kątem 60° [mm] / Penetration depth of RHA plate at distance 2000 m for incidence angle 60° [mm]	230 (dane producenta / Manufacturer data)	250 (wyniki badań strzel. / Results of firing tests)



Rys. 4. Model penetratora segmentowego opracowany w WITU

Fig. 4. Model of segmented penetrator developed in MIAT

Segmentowa konstrukcja pocisku umożliwia także zastosowanie różnych materiałów

The segmented design of the projectile gives a possibility for using different ma-

na poszczególne części penetratora tak, aby zmaksymalizować osiąganą przez niego zdolność penetracji pancerza [11].

### **2.5. Podsumowania analizy współczesnych 120 mm pocisków typu APFSDS-T w porównaniu z uzbrojeniem WP**

W tabeli 5 zaprezentowano podstawowe dane bojowe współczesnych czołgowych pocisków podkalibrowych typu APFSDS-T występujących w uzbrojeniu armii świata. W grupie pocisków podkalibrowych do 120 mm armat pociski będące w uzbrojeniu WP pod względem własności bojowych plasują się w środku rankingu.

### **3. Obliczenia wytrzymałościowe z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych konstrukcji 120 mm pocisków APFSDS-T z podstawowym wariantem sabotu, uwzględniające zastosowanie różnych stopów aluminium**

#### **3.1. Założenia przyjęte podczas analizy**

Wraz z rozwojem technologicznym poszukiwano coraz lepszych materiałów do produkcji sabotów. Wykorzystywano wysoko wytrzymałe stopy aluminium, które nieustannie rozwijano w celu osiągnięcia lepszych parametrów wytrzymałościowych. Pod koniec XX wieku w USA prowadzono testy kompozytowych sabotów dla pocisków do armat małokalibrowych, jak i do armat czołgowych. Pozytywne wyniki, których miarą było zwiększenie penetracji sprawiły, że obecnie coraz więcej firm bada i wykorzystuje materiały kompozytowe do produkcji sabotów.

Obliczenia wytrzymałościowe konstrukcji pocisku w momencie strzału przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie MES dla następujących wariantów:

materials for particular components of the penetrator in order to maximise its armour penetrating capacities [11].

### **2.5. Summary of Analysis of Existing 120 mm Projectiles of APFSDS-T Type Compared to Inventory of Polish Army**

Table 5 presents basic combat performance of tank kinetic energy projectiles of APFSDS-T type used by the armies in the world. In the group of kinetic energy projectiles for 120 mm guns the projectiles used by the Polish army can be placed in the middle of the ranking for combat performance.

### **3. Strength Calculations by Method of Finite Elements over the Design of 120 mm APFSDS-T Projectiles with Basic Sabot Option for Different Aluminium Alloys**

#### **3.1. Assumptions Taken for the Analysis**

Many suitable materials were tried for the production of sabots along with technological progress. Highly resistant alloys of aluminium were used and then permanently improved to get better strength parameters. At the end of 20<sup>th</sup> century in the US the tests of composite sabots were carried out for both medium calibre and tank guns. Positive results provided an increased penetration and now more companies investigate application of composite materials for production of sabots.

Computer code of Finite Elements Method (FEM) was used for strength calculations of the projectile design at instance of firing for following options:

Tabela 5. Analiza porównawcza pocisków produkcji niemieckiej, amerykańskiej, amerykańsko-niemieckiej oraz używanych przez Wojsko Polskie  
 Table 5. Comparison of projectiles of German, American and German-American production, and used by the Polish army

Nazwa pocisku / Name of projectile	DM 33	DM 43	DM 53/63	M 829	M 829A1	M 829A2	M 829A3	KE-W A1	KE-W A2	DM 33A1	PZ 531
Kaliber /Calibre [mm] / Armata / Gun	120 / L44	120 / L55	120 / L55	120 / M256	120 / M256	120 / M256	120 / M256	120 / M256	120 / M256	120 / L44	120 / L44
Prędkość początkowa / Muzzle velocity [m/s]	1650	1740	1750	1670	1560	1680	1555	1740	1700	1650	1650
Prędkość penetratora w chwili uderzenia w cel w odległości 2000 m / Impact Velocity on distance of 2000 m [m/s]	1530	1640	1640	1560	1460	1580	1455	1640	1600	1530	1530
Masa penetratora / Penetrator's mass [kg]	4	4	5	4	4,6	4,6	10	4	7,6	4,6	3,7
Średnica penetratora / Penetrator's diameter [mm]	27/30	24/27	24/27	26/29	22/25	22/25	25	22	22	28	24
Energia kinetyczna penetratora w chwili uderzenia w cel / Penetrator's kinetic energy at hitting a target [kJ]	4682	5379	6724	4867	4902	5741	10585	5379	9728	5384	4330
Gęstość energetyczna / Energetic density [kJ/mm <sup>2</sup> ]	6,6	7,6	11,7	6,6	7,6	11,7	18,5	10,9	19,8	7,6	8,2
Zdolność przebicia pancerza RHA w odległości 2000 m [mm] / Penetration depth of RHA plate at distance 2000 m [mm]	480 (dane producenta/Producer data)	560 (dane producenta/Producer data)	850 (szacowane/Estimated)	480 (dane producenta/Producer data)	560 (dane producenta/Producer data)	850 (szacowane/Estimated)	b/d Not available	b/d Not available	b/d Not available	460 (dane producenta/Producer data)	500

Produkcja niemiecka
  Produkcja amerykańska
  Produkcja amerykańsko-niemiecka
  Używane przez WP

- Wariant I – Podstawowy. Dwusegmentowy, połączony tuleją penetrator o długości 620 mm. Pocisk w trakcie wdrażania do uzbrojenia WP.

Dla tej konstrukcji wykonano 5 analiz:

- 4 dla sabotu wykonanego z różnych stopów aluminium,
- 1 dla sabotu wykonanego z kompozytu C-C.
- Wariant II - penetrator pocisku wydłużony o 60 mm w segmencie przednim.
- Wariant III – penetrator pocisku wydłużony o 60 mm w segmencie przednim oraz ze zmodyfikowanym sabotem.
- Wariant IV - penetrator pocisku wydłużony o 60 mm w segmencie przednim oraz ze zmodyfikowanym sabotem w celu maksymalnego zmniejszenia masy pocisku.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono wykorzystując program SolidWorks - moduł Simulation.

Do przeprowadzenia obliczeń zadania wytrzymałościowego przyjęto następujące założenia:

- liniowe charakterystyki materiałowe oraz izotropowość materiału penetratora, sabotu i pierścienia uszczelniającego,
- zakładając osiową symetrię geometrii sabotu model obliczeniowy przyjęto w formie wycinka wzdłużnego pocisku, który został ograniczony dwiema powierzchniami półprzekrojów, rozchylnymi o kąt  $120^\circ$ ,
- modelowany wycinek pocisku został spójcjonowany w układzie walcowym  $r, \phi, z$ .
- oddziaływanie lufy na pocisk zamodelowano, przyjmując podpory ciągłe przesuwne na powierzchniach styku półek prowadzących sabot w lufie (przedniej i tylnej) oraz na powierzchni styku lufy i pierścienia uszczelniającego,
- model połączenia kształtowego sabotu i penetratora został uproszczony do trwałego pełnego połączenia na powierzch-

- Option I – Basic. Two-segmented penetrator with 620 mm length connected by a sleeve. The projectile is now under the process of implementation for the Polish army

Five analyses were made for the mentioned design:

- 4 for the sabot made of different aluminium alloys,
- 1 for sabot made from C-C composite.
- Option II – projectile's penetrator elongated by 60 mm in the front segment.
- Option III – projectile's penetrator elongated by 60 mm in the front segment and modified sabot.
- Option IV - projectile's penetrator elongated by 60 mm in the front segment and modified sabot minimising the mass of projectile.

Numerical calculations were made by using SolidWorks computer code – Simulation module.

Following assumptions were made for calculation of strength parameters:

- Linear material characteristics and the isotropy of material for penetrator, sabot, and sealing ring,
- Assuming the axial symmetry of sabot geometry a calculating model was accepted in the form of a longitudinal section of the projectile limited by two planes of half-sections opened by the angle of  $120^\circ$ ,
- The modelled section of the projectile was positioned in the cylindrical system  $r, \phi, z$ .
- Reaction of the barrel against the projectile was modelled by assumption of continuous supports sliding on contacting surfaces of the shelves guiding the sabot inside the barrel (the front one and the rear one) and on the surface where the sealing ring sticks to barrel,
- Model of a shaped connection between the sabot and penetrator was simplified

- niach styku powyższych komponentów (nie zostało uwzględnione zazębienie),
- maksymalne ciśnienie oddziaływujące na pocisk w momencie strzału, dla temperatury ładunku miotającego 295 K, zostało zamodelowane obciążając tylną powierzchnię pocisku ciśnieniem o wartości 327,8 MPa,
  - w celu zrównoważenia oddziaływania ciśnienia gazów prochowych na pocisk w momencie strzału, wszystkie elementy pocisku zostały obciążone przyspieszeniem globalnym o wartości około 55000 g,
  - została przyjęta liniowo-sprężysta charakterystyka własności wytrzymałościowych materiałów: sabotu (stop aluminium 7075/kompozyt C-C), penetratora (spiek na osnowie wolframowej) oraz pierścienia uszczelniającego (poliamid), co wystarcza do określenia zakresu obciążeń, dla których następuje uplastycznienie materiału. Wykorzystując test Hopkinsona oszacowano wartości dynamicznych granic plastyczności materiałów penetratora i sabotu [12, 13]. Wartości te zostały przyjęte jako górne dopuszczalne wartości naprężeń zredukowanych (von Mises). Przekroczenie wartości zaprezentowanych w tabeli 6 może prowadzić do zniszczenia materiału.

- to a permanent complete joint on the sticking surfaces of these components (meshing was omitted),
- Maximal pressure acting against the projectile at the moment of firing for the projecting charge temperature 295 K was modelled by burdening the rear surface of the projectile with the pressure of 327.8 MPa)
  - In order to counterbalance the action of pressure of powder gases against the projectile at the moment of firing each component of the projectile was exposed to a total acceleration of ca. 55000 g,
  - The linear-elastic characteristics for material strength properties was accepted: sabot (aluminium alloy 7075/ composite C-C), penetrator (sintered tungsten) and the sealing ring (polyamide), what is sufficient for establishing the range of loads effecting the plasticity of material. Dynamic limits of plasticity for materials of sabot and penetrator were estimated by Hopkinson's test [12, 13]. These values were accepted as the highest acceptable values of reduces stresses (von Mises). For values exceeding those presented in table 6 the material may break down.

Tabela 6. Dane materiałowe uwzględnione w obliczeniach

Table 6. Material parameters taken for calculations

Materiał Material	Gęstość Density ( $\gamma$ ) [g/cm <sup>3</sup> ]	Moduł Young'e'a (E) Young's modulus [MPa]	Liczba Poisson'a Poisson's ratio	R <sub>02</sub> [MPa]
Stop aluminium 7075 (sabot) Aluminium alloy 7075 (sabot)	2,85	71600	0,33	800 (dynamiczna) (dynamic)
Kompozyt C-C (sabot) Composite C-C (sabot)	1,88	240000	0,4	1200 (dynamiczna) (dynamic)
Spiek wolframu (penetrator) Sintered tungsten (penetrator)	17,3	340000	0,3	2600 (dynamiczna) (dynamic)
Stal (tuleja łącząca) Steel (connecting sleeve)	7,8	210000	0,3	2230 (dynamiczna) (dynamic)
Poliamid (pierścień uszczelniający) / Polyamide (sealing ring)	1,1	7100	0,42	86 (statyczna) (static)

### 3.2. Wariant I

Pierwszą grupą materiałów wykorzystywaną do produkcji sabotów pocisków podkalibrowych są wysoko wytrzymałe stopy aluminium. Jako materiał został wybrany stop 7075. 7075 (AA7075) jest stopem aluminium kuty na zimno. Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością. Odmiany T6 i T651 posiadają wytrzymałość na rozciąganie około 570 MPa, która jest wyższa niż w przypadku kilku rodzajów stali. Ze względu na bardzo wysoką wytrzymałość stop 7075 jest stosowany do wysoko obciążonych elementów konstrukcyjnych. Zastosowania obejmują osprzęt statku powietrznego, koła zębate i wały, części bezpieczników, wały i koła zębate, części pocisków, zawory regulacyjne, przekładnie ślimakowe.

Stopy w postaci prętów lub prostopadłościennych płyt można obrabiać na obrabiarzach wielorzecionowych i CNC. Stop aluminium 7075 oferuje dobrą obrabialność przy użyciu narzędzi węglkowych. Zalecane jest użycie łamacza wiórów. Stop ma oznaczenie „B” w systemie oceny skrawalności, co daje zwinięte lub łatwo łamliwe wióry z dobrym lub doskonałym wykończeniem powierzchni.

Stop 7075 ma umiarkowaną odporność na korozję (według Aluminium Association Inc.). Odmiana T73 posiada zdecydowanie wyższą odporność na pęknięcie korozyjne w porównaniu z T6 i T651. Bezpośredni kontakt różnych metali może powodować korozję galwaniczną [14].

### 3.2. Option I

Highly resistant aluminium alloys are the first group of materials used for production of sabots for kinetic energy projectiles. Alloy 7075 was chosen. 7075 (AA7075) aluminium alloy is a cold forged alloy. It is characterised by the high strength. The grades T6 and T651 have the tensile strength of ca. 570 MPa which is higher than for a few grades of steel. Due to the high strength the alloy 7075 is used for highly loaded structural members. The applications include parts for aerial vehicles, cog-wheels and shafts, components of safeties, projectiles, controlling valves and worm gears.

The alloys having the form of rods or cuboidal plates may be processed by multi-tool machines and CNC. Aluminium alloy 7075 can be easily processed by carbide tools. The use of shaving breakers is recommended. The alloy is marked by „B” in the system evaluating the parameters of cutting, what indicates that the shavings are curled or easy breaking, and provides a good or perfect finishing of the surface.

Alloy 7075 has a mean resistance against corrosion (according to Aluminium Association Inc.). The grade T73 has a significantly higher resistance against corrosive cracking than T6 and T651. Direct contact of different metals may effect a galvanic corrosion [14].

Tabela 7. Główne pierwiastki w stopie aluminium 7075  
Table 7. Main elements of aluminium alloy 7075

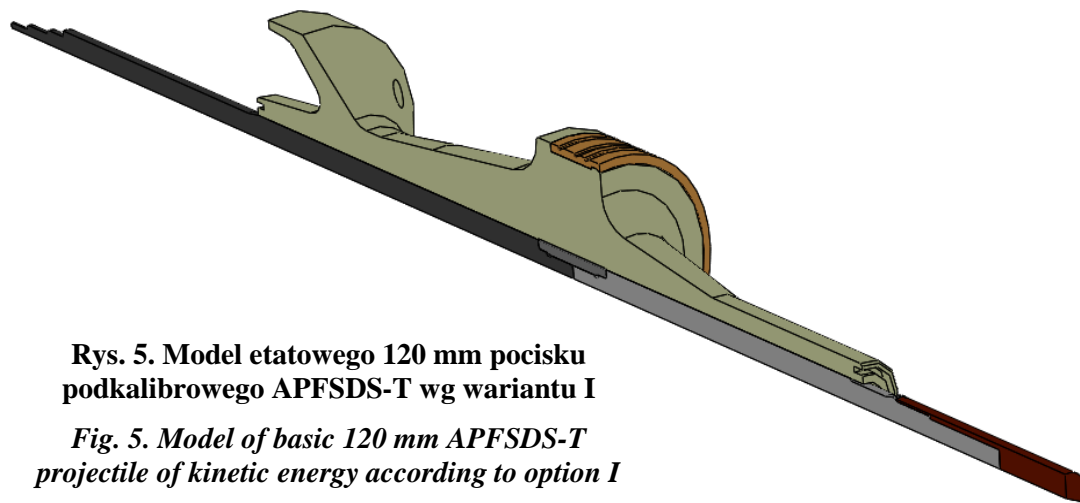
Pierwiastek stopowy Alloy element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
Ilość [%] Content	Max 0,4	Max 0,5	1,2- 2	Max 0,3	2,1- 2,9	0,18- 0,28	5,1- 6,1	Max 0,2

Wśród stopów aluminium 7075 wyróżniamy kilka odmian. Różnią się między sobą zawartością pierwiastków stopowych oraz metodą otrzymywania. Poszczególne rodzaje

Among 7075 aluminium alloys a few brands can be distinguished. They differ by contents of alloy elements and by method of production. Particular brands are also

charakteryzują się także różnymi właściwościami mechanicznymi. W celu wyboru najbardziej wytrzymałego stopu aluminium, dla pocisku etatowego według wariantu I przedstawionego na rys. 5 przeprowadzono szereg obliczeń wytrzymałościowych z wykorzystaniem metody MES. Wyniki wraz z opisem testowanych materiałów zaprezentowano w dalszej części pracy.

characterised by different mechanical properties. In order to select the most resistant alloy of aluminium for the basic projectile and in line to the option presented in Fig. 5 a series of strength calculations was performed using the FEM. The results are presented in following chapters together with description of tested materials.



**Rys. 5. Model etatowego 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T wg wariantu I**

*Fig. 5. Model of basic 120 mm APFSDS-T projectile of kinetic energy according to option I*

### 3.2.1. Stop 7075-0

Nieobrobiony cieplnie stop aluminium 7075-0 posiada maksymalną wytrzymałość na rozciąganie nie większą niż 280 MPa oraz granicę plastyczności poniżej 140 MPa. Wydłużenie do uszkodzenia wynosi 9-10%. Podobnie jak w przypadku wszystkich stopów aluminium 7075, 7075-0 jest wysoce odporny na korozję w połączeniu z ogólnie akceptowanym profilem wytrzymałości.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych według hipotezy von Mises w momencie strzału dla pocisku etatowego z sabotem wykonanym ze stopu 7075-0. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 120 mm przed tuleją łączącą 1413 MPa oraz 90 mm za tuleją 2221 MPa. Największe naprężenie 3237 MPa wystąpiło w końcowym punkcie połączenia penetratora z sabotem. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju

### 3.2.1. Alloy 7075-0

Thermally untreated aluminium alloy 7075-0 has the maximal tensile strength up to 280 MPa and the limit of plasticity below 140 MPa. Elongation before the breaking is 9-10%. Similarly to all aluminium alloys of 7075 brand, 7075-0 is highly resistant against corrosion in connection with commonly accepted profile of the strength.

Fig. 6 shows a pattern of reduced stresses according to von Mises' hypothesis at the moment of firing a basic projectile with the sabot made of 7075-0 alloy. The main places of stress concentration in the penetrator are located ca. 120 mm before the joining sleeve with 1413 MPa, and 90 mm behind the sleeve with 2221 MPa. The highest stress of 3237 MPa has occurred at the terminal point of connection between the penetrator and sabot. The stresses for the frontal and rear critical cross sections of

niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1142 MPa i 1592 MPa.

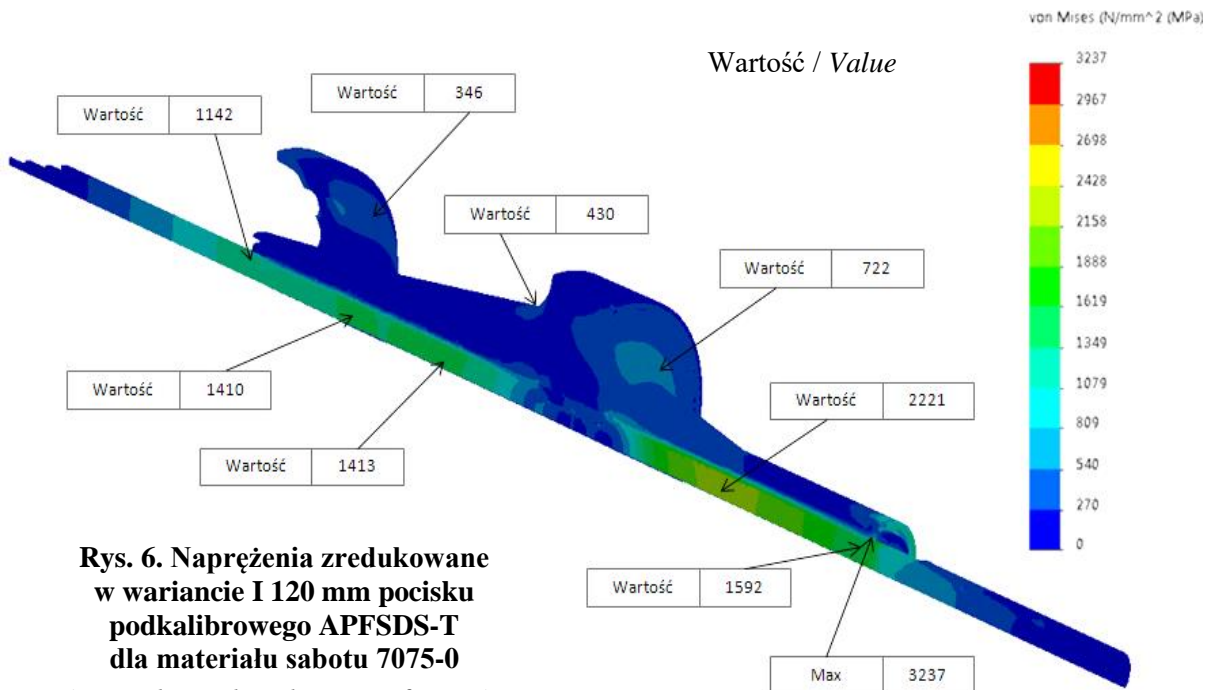
Wyteżenie materiału sabotu (7075-0) wg hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

1. 722 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość 327 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężenia  $\sigma_r$  osiąga wartość 356 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia  $\sigma_\varphi$  osiąga wartość 83 MPa. Składowa naprężenia tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -419 MPa.
2. 430 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość -403 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężenia  $\sigma_r$  osiąga wartość -243 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia  $\sigma_\varphi$  osiąga wartość -158 MPa. Składowa naprężenia tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -222 MPa.

the rod were respectively 1142 MPa and 1592 MPa.

Reduced stresses of sabot's material (7075-0) according to von Mises' hypothesis for critical cross sections were equal to:

1. 722 MPa in the place of transition between the rear part of the sabot and the supporting shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value 327 MPa (tension), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value 356 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\varphi$  has the value 83 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  value -419 MPa.
2. 430 MPa on the other side of the rear shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value -403 MPa (compression), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value -243 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\varphi$  has the value -158 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  value -222 MPa.



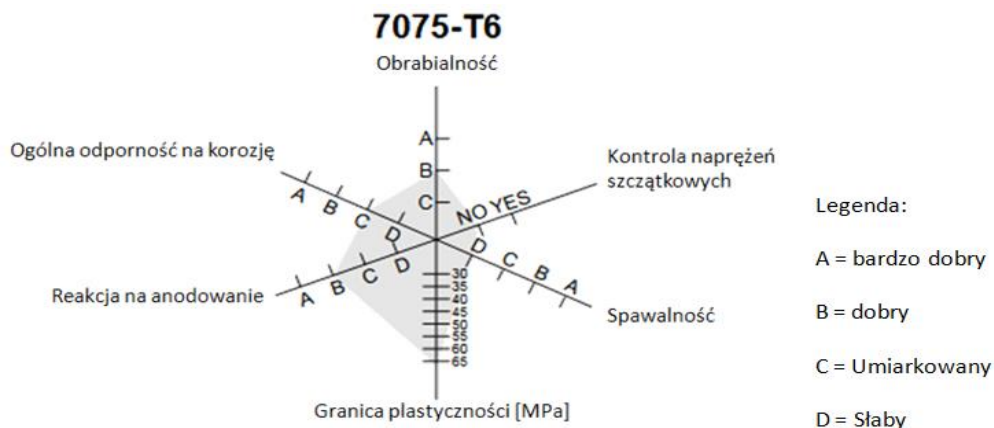
**Rys. 6. Naprężenia zredukowane w wariancie I 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T dla materiału sabotu 7075-0**

*Fig. 6. The Reduced stresses for option I of 120 mm APFSDS-T kinetic energy projectile and for sabot material 7075-0*



### 3.2.2. Stop 7075-T6

### 3.2.2. Alloy 7075-T6



**Rys. 7. Właściwości stopu 7075-T6 [16]**  
**Fig. 7. Characteristics of 7075-T6 alloy [16]**

Obrabialność – *Machining*

Kontrola naprężeń szczątkowych – *Management of residual stresses*

Spawalność – *Weldability*

Granica plastyczności – *Plasticity limit*

Reakcja na anodowanie – *Reaction against anodizing*

Ogólna odporność na korozję – *General resistance to corrosion*

Legenda – *Legend*

Bardzo dobry – *Very good*

Dobry – *Good*

Umiarkowany – *Mean*

Słaby – *Weak*

Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie stopu 7075-T6 wynosi między 510 a 570 MPa, granica plastyczności pomiędzy 430 a 480 MPa. Wydłużenie do uszkodzenia mieści się w przedziale 5-11%.

Stop w stanie T6 zwykle osiąga się przez homogenizację odlewu 7075 w 450°C przez kilka godzin, hartowanie, a następnie starzenie w 120°C przez 24 godziny. To daje szczytową wytrzymałość bazowego stopu 7075.

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises w momencie strzału dla pocisku etatowego z sabotem wykonanym ze stopu 7075-T6. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 105 mm za tuleją 1707 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w początkowym punkcie połączenia penetratora z sabotem 2300 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1130 MPa i 1559 MPa.

Wyteżenie materiału sabotu (7075-T6) wg hipotezy von Mises w przekrojach nie-

Maximal tensile strength of 7075-T6 alloy is between 510 and 570 MPa. The plasticity limit is between 430 and 480 MPa. Extension at breaking is 5-11%.

The alloy of T6 brand is usually received by a homogenisation of 7075 cast at 450°C during a few hours, hardening and eventual ageing at 120°C by 24 hours. This provides maximal strength for basic 7075 alloy.

Fig. 8 shows a pattern of reduced stresses according to von Mises' hypothesis at the moment of firing for the basic projectile with the sabot made of 7075-T6 alloy. The main concentrations of stresses in penetrator are located ca. 105 mm behind the sleeve and are equal to 1707 MPa. The greatest local stress of 2300 MPa has occurred in the original point of connection between the penetrator and sabot. The stresses in the frontal and rear critical cross sections of the rod were respectively 1130 MPa and 1559 MPa.

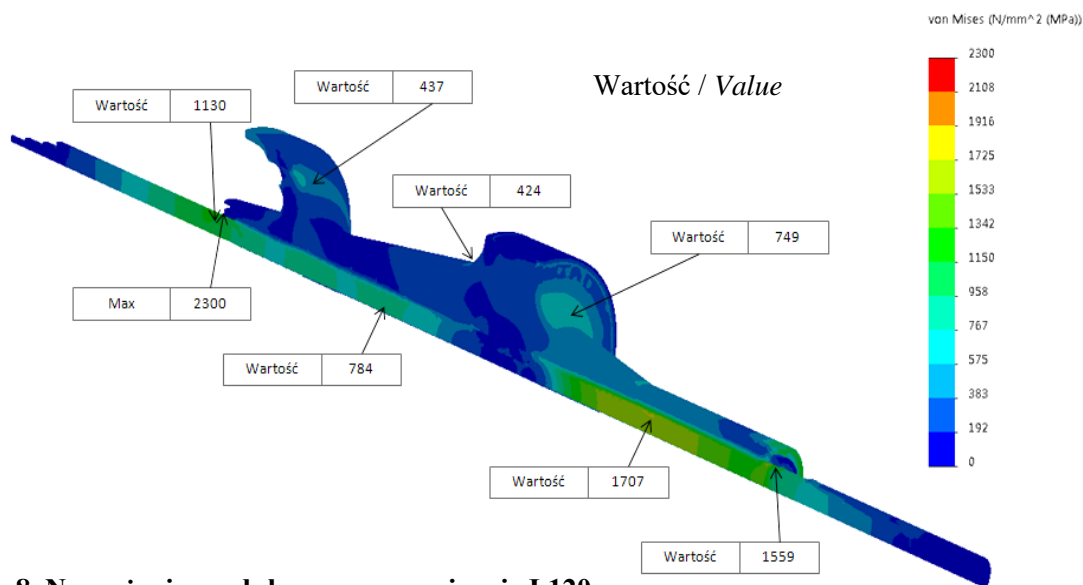
Reduced stresses for material of sabot (7075-T6) according to von Mises' hypoth-

bezpiecznych wyniosło:

1. 749 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość 348 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężenia  $\sigma_r$  osiąga wartość 365 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia  $\sigma_\phi$  osiąga wartość 166 MPa. Składowa naprężenia tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -426 MPa.
2. 424 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość -417 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężenia  $\sigma_r$  osiąga wartość -227 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia  $\sigma_\phi$  osiąga wartość 144 MPa. Składowa naprężenia tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -214 MPa.

esis and for critical cross sections were:

1. 749 MPa in the place of transition of the sabot rear part into the supporting shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value 348 MPa (tension), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value 365 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\phi$  has the value 166 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  has the value -426 MPa.
2. 424 MPa on the other side of the rear shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value -417 MPa (compression), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value -227 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\phi$  has the value -144 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  is -214 MPa.



**Rys. 8. Naprężenia zredukowane w wariancie I 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T dla materiału sabotu 7075-T6**

*Fig. 8. The reduced stresses for option I of 120 mm APFSDS-T kinetic energy projectile and sabot material 7075-T6*

### 3.2.3. Stop 7075-T651

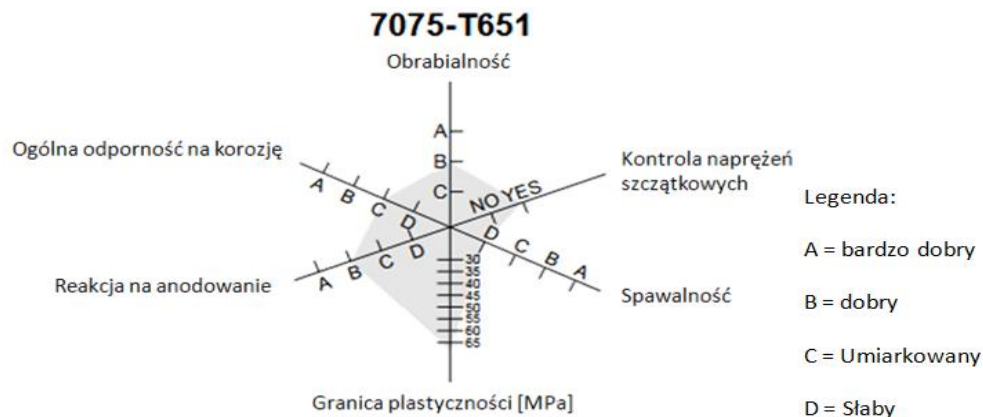
Stop 7075-T651 charakteryzuje się maksymalną wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 570 MPa, granicą plastyczności 500 MPa. Wydłużenie do uszkodzenia wynosi 3-9%. Właściwości mogą ulec zmianie w zależności od grubości użytego materiału. Wraz ze wzrostem grubości materiału jego właściwo-

### 3.2.3. Alloy 7075-T651

The alloy 7075-T651 is characterised by the maximal tensile strength on the level of 570 MPa, the limit of plasticity 500 MPa. Extension before breaking is 3-9%. The properties may change depending on the thickness of used material. Its mechanical properties go slightly down with the in-

ści mechaniczne nieznacznie spadają.

crease of the material thickness.



**Rys. 9. Właściwości stopu 7075-T651 [16]**  
**Fig. 9. Characteristics of 7075-T651 alloy [16]**

Obrabialność – *Machining*

Kontrola naprężeń szczątkowych – *Management of residual stresses*

Spawalność – *Weldability*

Granica plastyczności – *Plasticity limit*

Reakcja na anodowanie – *Reaction against anodizing*

Ogólna odporność na korozję – *General resistance to corrosion*

Legenda – *Legend*

Bardzo dobry – *Very good*

Dobry – *Good*

Umiarkowany – *Mean*

Słaby – *Weak*

Na rysunku 11 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises w momencie strzału dla pocisku etatowego z sabotem wykonanym ze stopu 7075-T651. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 115 mm za tuleją 1731 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w początkowym punkcie połączenia penetratora z sabotem 2278 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1156 MPa i 1414 MPa.

Wytężenie materiału sabotu (7075-T651) wg hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

1. 722 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość 359 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężenia  $\sigma_r$  osiąga wartość 370 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia  $\sigma_\phi$  osiąga wartość 178 MPa. Składowa naprężenia tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -429 MPa.

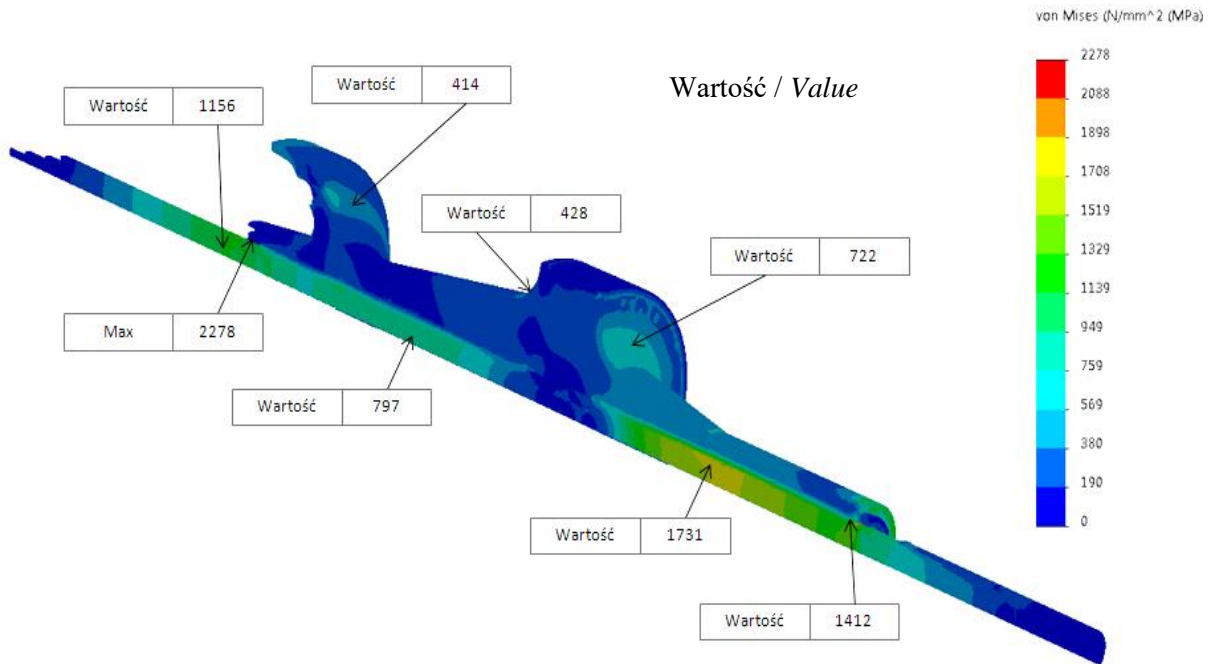
Fig. 11 shows a pattern of reduced stresses according to von Mises' hypothesis at the moment of firing for the basic projectile with the sabot made of 7075-T651 alloy. The main concentrations of stresses in penetrator are located ca. 115 mm behind the sleeve and are equal to 1731 MPa. The greatest local stress of 2278 MPa has occurred in the original point of connection between the penetrator and sabot. The stresses in the frontal and rear critical cross sections of the rod were respectively 1156 MPa and 1414 MPa.

Reduced stresses for material of sabot (7075-T651) according to von Mises' hypothesis and for critical cross sections were:

1. 722 MPa in the place of transition of the sabot rear part into the supporting shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value 359 MPa (tension), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value 370 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\phi$  has the value 178 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  has the value -429 MPa.

2. 428 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość -411 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężenia  $\sigma_r$  osiąga wartość -231 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia  $\sigma_\varphi$  osiąga wartość -161 MPa. Składowa naprężenia tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -216 MPa.

2. 428 MPa on the other side of the rear shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value -411 MPa (compression), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value -231 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\varphi$  has the value -161 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  is -216 MPa.



**Rys. 10. Naprężenia zredukowane w wariantcie I 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T dla materiału sabotu 7075-T651**

**Fig. 10. The reduced stresses for option I of 120 mm APFSDS-T kinetic energy projectile and sabot material 7075-T651**

### 3.2.4. Stop 7075-T73

Stop 7075-T73 ma zdolność do dużych odkształceń przed zniszczeniem, około 13%. Maksymalna wytrzymałość na rozciąganie to 505 MPa, natomiast granica plastyczności to 435 MPa. Stop T73 otrzymywany jest poprzez nadmierne starzenie tzn. starzenie powyżej twardości szczytowej materiału. Najczęściej stosowaną metodą otrzymywania jest starzenie w temperaturze 100-120°C przez kilka godzin, a następnie w temperaturze 160-180°C przez 24h lub dłużej.

Na rysunku 13 przedstawiono rozkład naprężenia zredukowanych wg hipotezy von

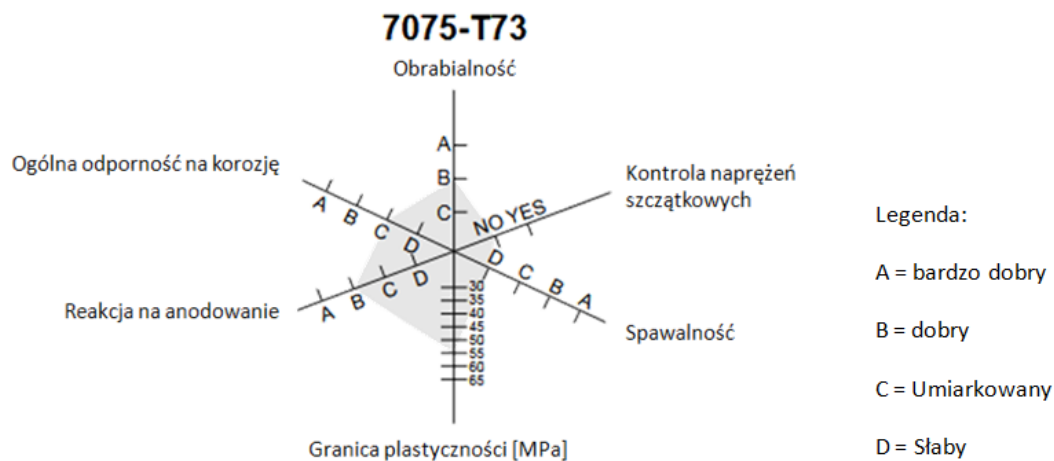
### 3.2.4. Alloy 7075-T73

The alloy 7075-T73 can afford high strains before breaking, ca. 13%. Maximal tensile strength is 505 MPa, and the plasticity limit is 435 MPa. Alloy T73 is received through the over-aging, i.e. the aging above the maximal material hardness. In most cases the applied method uses the aging at 100-120°C within few hours, and next at temperatures 160-180°C by 24h or longer.

Fig. 13 shows a pattern of reduced stresses according to von Mises' hypothesis at the moment of firing for the basic projec-

Mises w momencie strzału dla pocisku etatowego z sabotem wykonanym ze stopu 7075-T73. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 110 mm za tuleją 1778 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w początkowym punkcie połączenia penetratora z sabotem 2225 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1189 MPa i 1580 MPa.

tile with the sabot made of 7075-T73 alloy. The main concentrations of stresses in penetrator are located ca. 110 mm behind the sleeve and are equal to 1778 MPa. The greatest local stress of 2225 MPa has occurred in the original point of connection between the penetrator and sabot. The stresses in the frontal and rear critical cross sections of the rod were respectively 1189 MPa and 1580 MPa.



**Rys. 11. Właściwości stopu 7075-T73 [16]**  
**Fig. 11. Characteristics of 7075-T73 alloy [16]**

Obrabialność – *Machining*

Kontrola naprężeń szczątkowych – *Management of residual stresses*

Spawalność – *Weldability*

Granica plastyczności – *Plasticity limit*

Reakcja na anodowanie – *Reaction against anodizing*

Ogólna odporność na korozję – *General resistance to corrosion*

Legenda – *Legend*

Bardzo dobry – *Very good*

Dobry – *Good*

Umiarkowany – *Mean*

Słaby – *Weak*

Wytyżenie materiału sabotu (7075-T73) wg hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

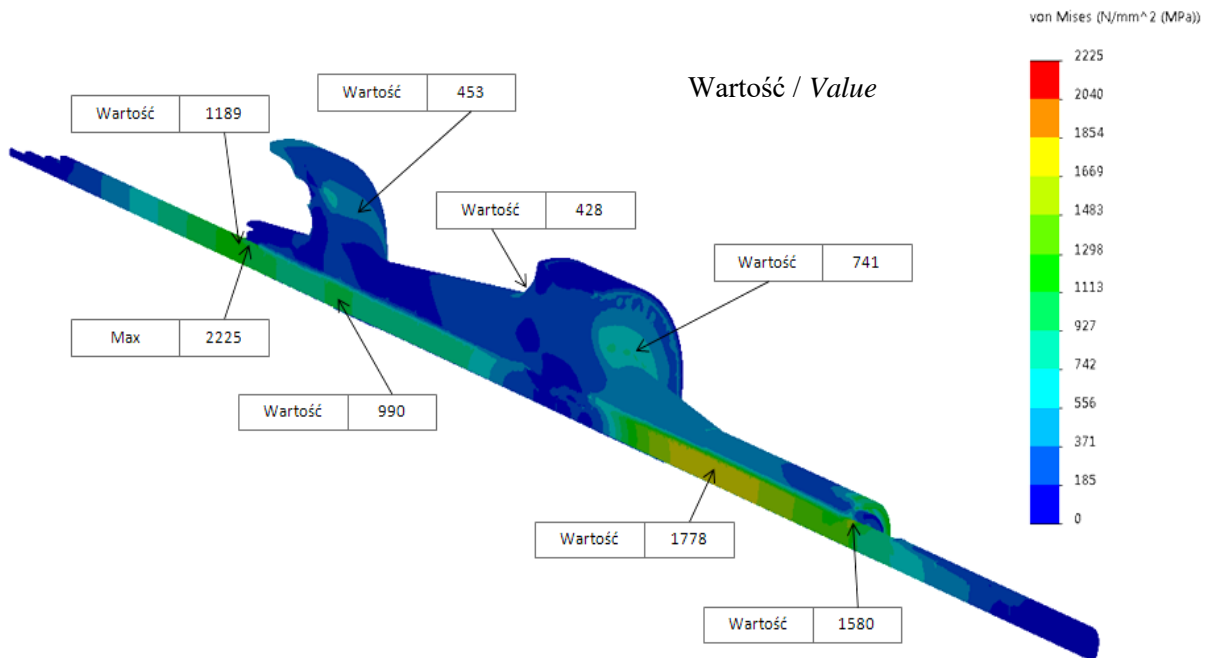
1. 741 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń  $\sigma_z$  osiąga wartość 359 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężeń  $\sigma_r$  osiąga wartość 372 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń  $\sigma_\phi$  osiąga wartość 84 MPa. Składowa naprężeń tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -423 MPa.
2. 428 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprę-

Reduced stresses for material of sabot (7075-T73) according to von Mises' hypothesis and for critical cross sections were:

1. 741 MPa in the place of transition of the sabot rear part into the supporting shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value 359 MPa (tension), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value 372 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\phi$  has the value 84 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  has the value -423 MPa.
2. 428 MPa on the other side of the rear shelf. In this place the axial component of

żeń  $\sigma_z$  osiąga wartość -407 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężeń  $\sigma_r$  osiąga wartość -233 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń  $\sigma_\varphi$  osiąga wartość -128 MPa. Składowa naprężeń tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -219 MPa.

stresses  $\sigma_z$  reaches the value -407 MPa (compression), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value -233 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\varphi$  has the value -128 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  is -219 MPa.



**Rys. 12. Naprężenia zredukowane w wariantcie I 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T dla materiału sabotu 7075-T73**

**Fig. 12. The reduced stresses for option I of 120 mm APFSDS-T kinetic energy projectile and sabot material 7075-T73**

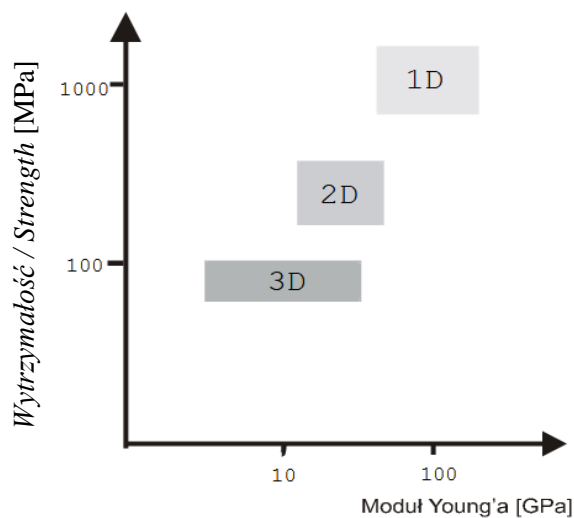
### 3.2.5. Kompozyt C-C

Kompozyty składające się z osnowy i wzmocnienia wykonanych z węgla należą do najbardziej zaawansowanych i rozwojowych materiałów konstrukcyjnych. Posiadają szereg zalet. Do najważniejszych należą wytrzymałość na rozciąganie nawet w bardzo wysokich temperaturach rzędu 2000°C oraz wysoki moduł sprężystości podłużnej, odporność na pełzanie oraz względnie wysoka wytrzymałość na kruche pęknięcie. Gęstość tych kompozytów wynosi około 2 g/cm<sup>3</sup> i jest zbliżona do gęstości kompozytów polimerowych. Kolejnymi zaletami kompozytów węgiel-węgiel są wysokie: przewodność cieplna i współczynnik rozszerzalności termicznej. Niestety skutkuje to niską wrażliwością kom-

### 3.2.5. Composite C-C

The composites containing a matrix and enforcements made of carbon belong to most advanced and perspective structural materials. One of the most important features is a high tensile strength even at temperatures to 2000 °C and the high modulus of longitudinal elasticity. It is resistant against creeping and has relatively high strength against crushed breaking. Density of these composites is ca. 2.0 g/cm<sup>3</sup> and is similar to density of polymeric composites. The carbon-carbon composites have also high values of such parameters as thermal conductivity and coefficient of thermal extension. Unfortunately it effects low sensitivity of composites against

pozytów na szok termiczny. Kolejną wadą kompozytów węgiel-węgiel jest skłonność do gwałtownego utleniania w wysokich temperaturach. Powoduje to bardzo szybki spadek właściwości mechanicznych kompozytu. Wynika to z miejsca przebiegania procesu (na granicy włókien z osnową). Ze względów wytrzymałościowych jest to jeden z krytycznych obszarów odpowiadających za właściwości mechaniczne kompozytu [14].



thermal shocks. One of next disadvantages of carbon-carbon composites is a tendency for a rapid oxidation at high temperatures. It causes a sharp deterioration of composite mechanical properties. It is a result of the place where the process runs (at the border of fibres and matrix). Regarding the strength parameters it is one of critical areas responsible for mechanical properties of composite [14].

**Rys. 13. Zależność wytrzymałości na zginanie od wartości modułu Younga dla kompozytu węgiel-węgiel przy jednokierunkowej (1D), dwukierunkowej (2D) i trójkierunkowej (3D) orientacji włókien w osnowie [8]**

*Fig. 13. Dependence of the strength against bending on the value of Young's modulus for carbon-carbon composite at one directional (1D), bidirectional (2D) and three-directional (3D) orientation of fibres in the matrix [8]*

Na rysunku 14 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises w momencie strzału dla pocisku etatowego z sabotem wykonanym z kompozytu C-C. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 125 mm za tuleją 1029 MPa oraz na początku połączenia sabotu z penetratorem 1087 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w początkowym punkcie połączenia penetratora z sabotem 2951 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1087 MPa i 1164 MPa.

Wyężenie materiału sabotu (kompozyt C-C) wg hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

1. 747 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia  $\sigma_z$  osiąga wartość 335 MPa (rozciąganie),

Fig. 14 shows a pattern of reduced stresses according to von Mises' hypothesis at the moment of firing for the basic projectile with the sabot made of C-C composite. The main concentrations of stresses in penetrator are located ca. 125 mm behind the sleeve, 1029 MPa, and at the place where the connection sabot-penetrator starts, 1087 MPa. The greatest local stress of 2951 MPa has occurred in the original point of connection between the penetrator and sabot. Stresses in the frontal and rear critical cross sections of the rod were respectively 1087 MPa and 1164 MPa.

Reduced stresses for material of sabot (C-C composite) according to von Mises' hypothesis at critical cross sections were:

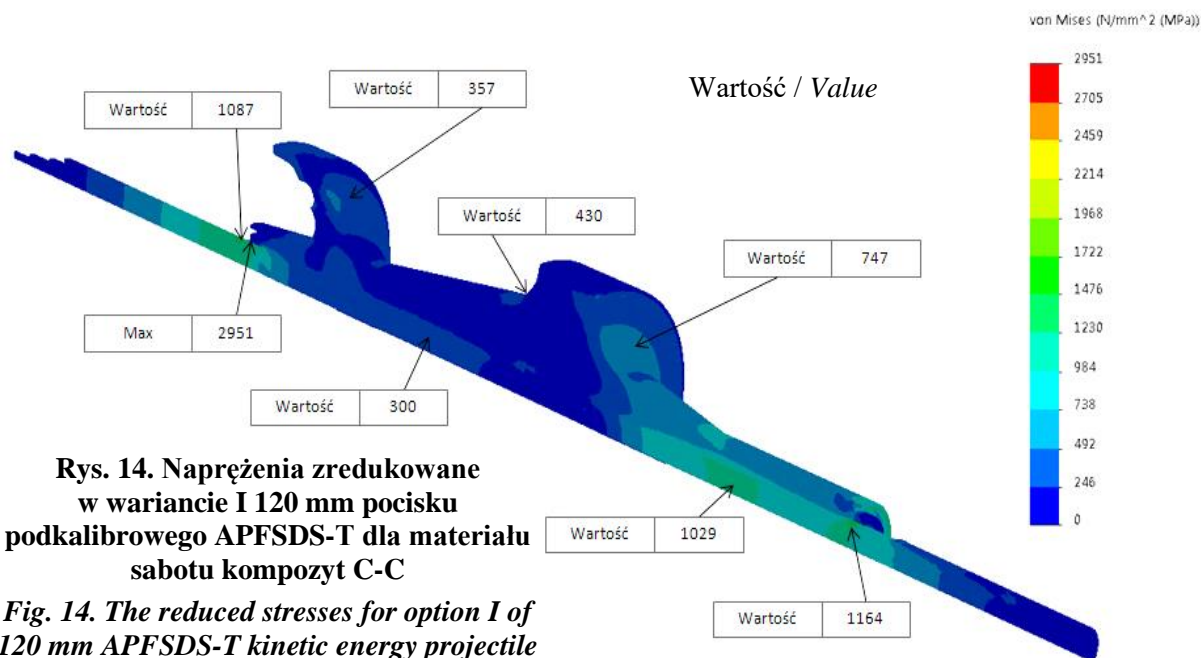
1. 747 MPa in the place of transition of the sabot rear part into the supporting shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value 335 MPa

składowa promieniowa naprężeń  $\sigma_r$  osiąga wartość 317 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń  $\sigma_\phi$  osiąga wartość 41 MPa. Składowa naprężeń tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -380 MPa.

2. 430 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń  $\sigma_z$  osiąga wartość -341 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężeń  $\sigma_r$  osiąga wartość -106 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń  $\sigma_\phi$  osiąga wartość -87 MPa. Składowa naprężeń tnących  $\tau_{rz}$  osiąga wartość -144 MPa.

(tension), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value 317 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\phi$  has the value 41 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  is -380 MPa.

2. 430 MPa on the other side of the rear shelf. In this place the axial component of stresses  $\sigma_z$  reaches the value -341 MPa (compression), the radial component of stresses  $\sigma_r$  has the value -106 MPa, and the perimeter component of stresses  $\sigma_\phi$  has the value -87 MPa. The component of shearing stresses  $\tau_{rz}$  is -144 MPa.



**Rys. 14. Naprężenia zredukowane w wariacie I 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T dla materiału sabotu kompozyt C-C**

**Fig. 14. The reduced stresses for option I of 120 mm APFSDS-T kinetic energy projectile and C-C composite as the sabot material**

### 3.2.6. Podsumowanie wariantu I

Na podstawie analizy otrzymanych wyników uznano, że spośród różnych odmian stopu aluminium 7075 najlepiej sprawdza się stop 7075-T651. Dla tego stopu, rozpatrując całe połączenie kształtowe pomiędzy penetratorem i sabotem, naprężenia zredukowane nie przekraczają 2300 MPa. Wobec uzyskanego symulowanego stanu naprężeń wariant ten wymaga modyfikacji konstrukcyjnej. Celem modyfikacji jest obniżenie wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych do wcześniej założonego poziomu bezpieczeństwa 2000 MPa.

### 3.2.6. Summary of Option I

The analysis of received results shows that the alloy 7075-T651 is the most suitable from the selection of 7075 aluminium alloys. For this alloy the reduced stresses don't exceed 2300 MPa in the area of the whole shaped connection between the penetrator and sabot. Considering the received levels of simulated stresses the option requires some designing modifications reducing the values of maximal reduced stresses to the assumed level of safety 2000 MPa.



Otrzymane wyniki symulowanego stanu naprężeń dla wariantu pocisku z sabotem wykonanym z kompozytu C-C sugerują konieczność modyfikacji konstrukcyjnej. Pomimo bardzo dobrego rozkładu naprężeń między penetratorem a sabotem, istnieją obszary w których wartość naprężeń (około 3000 MPa) zdecydowanie przekracza założony poziom bezpieczeństwa.

Do dalszych modyfikacji konstrukcji zostały przyjęte materiały:

- stop aluminium 7075-T651,
- kompozyt C-C.

Wyniki uzyskane dla wariantu podstawowego stanowią wartości referencyjne w dalszej analizie.

Rezultaty dalszych prac będą zaprezentowane w części II niniejszej publikacji.

Received results of simulated patterns of stresses for the option of projectile with the sabot made of C-C composite indicate that a structural modification is needed. Despite very good distribution of stresses between the penetrator and sabot there are some regions where the stresses (ca. 3000 MPa) exceed significantly the assumed level of safety.

Following materials were taken for further modifications of the structure:

- aluminium alloy 7075-T651,
- composite C-C.

The results received for the basic option are referential values of further studies.

Results of continued work will be presented in the second part of the paper.

## **Literatura / Literature**

- [1] M. Magier, *Koncepcja czołgowego pocisku podkalibrowego nowej generacji o zwiększonej zdolności przebicia pancerzy współczesnych czołgów*, Problemy Techniki Uzbrojenia, zeszyt 102, 2/2007, str. 69-80.
- [2] E. Włodarczyk, M. Magier, *Analiza koncentracji osiowego naprężenia w rdzeniu wydłużonego pocisku podkalibrowego podczas strzału*, Biuletyn WAT 53 (2-3), str. 109-132.
- [3] K. Motyl, M. Magier, J. Borkowski, B. Zygmunt: *Theoretical and experimental research of anti-tank kinetic penetrator ballistics*. Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences, Vol. 65, No. 3, 2017 DOI: 10.1515/bpasts-2017-004.
- [4] K. Jach, R. Świerczyński, M. Magier, *Analiza numeryczna procesu penetracji stalowego pancerza przez pocisk podkalibrowy z penetratorem jednorodnym i segmentowym*, (2008) Biuletyn WAT, 57 (1), str. 185-201.
- [5] L. Kruszka, M. Magier, *Experimental investigations of visco-plastic properties of the aluminium and tungsten alloys used in KE projectiles*, European Physical Journal Web of Conferences 26, 05005 (2012).
- [6] M. Magier, *Wybrane problemy rozwoju kinetycznej amunicji przeciwpancernej*, Wydawnictwo Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zielonka 2020, ISBN: 978-83-953726-3-6.
- [7] "Steelbeasts", [online] [dostęp 12 sierpnia 2020]. Dostępne w Internecie <http://www.steelbeasts.com>.
- [8] "Defense-update", [online] [dostęp 12 sierpnia 2020]. Dostępne w Internecie <https://defense-update.com>.
- [9] M. Magier, The conception of the segmented kinetic energy penetrators for tank guns. Jour-

- nal of Applied Mechanics- Transactions of The ASME, (2010) Vol.77, 5, pp. 051802-1÷10.
- [10] M. Magier, *Analiza numeryczna wpływu modyfikacji dwusegmentowego kinetycznego pocisku wolframowego na głębokość przebicia pancerza RHA*, Problemy Techniki Uzbrojenia, zeszyt 107, 3/2008, str. 43-60.
- [11] M. Magier, *Koncepcja czołgowego pocisku podkalibrowego nowej generacji o zwiększonej zdolności przebicia pancerzy współczesnych czołgów*, Problemy Techniki Uzbrojenia, zeszyt 102, 2/2007, str. 69-80.
- [12] J. Wolski, *Tendencje rozwojowe przeciwpancernych pocisków podkalibrowych*, Nowa Technika Wojskowa nr 9/2016, str. 28-37, 2016.
- [13] L. Kruszka, M. Magier, E. Włodarczyk, *Doświadczalne badania lepkoplastycznych własności stopu aluminium PA9*, materiały z V Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej NATU Waplewo, 6-8.10.2004 r., str. 468-474.
- [14] T. Błaszczak, *Analiza własności materiałów konstrukcyjnych używanych na saboty pocisków podkalibrowych*. Praca przejściowa magisterska, Warszawa 2020. Niepublikowane.



