



**ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU KONSTRUKCJI SABOTU POCISKU
PODKALIBROWEGO NA GŁĘBOKOŚĆ PRZEBICIA PANCERZA.
CZEŚĆ II – ANALIZA WARIANTÓW ROZWOJOWYCH POCISKU**
***NUMERICAL ANALYSIS OF KINETIC ENERGY PROJECTILE SABOT
STRUCTURE INFLUENCING THE ARMOUR PENETRATION DEPTH.
PART II – ANALYSIS OF PROJECTILE DEVELOPING OPTIONS***

Tomasz BŁASZCZAK, Mariusz MAGIER

Zakład Mechaniki i Technik 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 10.5604/01.3001.0015.2498

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 z użyciem 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,

Abstract: Numerical calculations were used to investigate influence of sabot structures of kinetic energy projectiles into the armour penetration depth. Areas of sabot structure for possible optimization and the influence of various sabot materials on the projectile combat efficiency were indicated. The analysis was performed using the finite element method in the Solidworks Simulation environment. It allowed examination of dynamic loads the sabot is subjected to at the time of the shot. Impact of various sabot materials and projectile geometry modifications on the strength of penetrator - sabot connection was investigated. Distributions of dynamical loads for penetrator-sabot connections were simulated and visualised. Calculations on terminal ballistics were performed for some options of the structure. It allowed identification of development trends for this type of ammunition.

Keywords: kinetic projectile, penetration,

symulacje numeryczne

1. Wstęp

Na podstawie analizy wyników zaprezentowanych w części I niniejszej publikacji 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 [1-14]. Wyniki uzyskane dla wariantu podstawowego stanowią wartości referencyjne wykorzystane w dalszych analizach wariantów rozwojowych pocisku, których rezultaty są zaprezentowane poniżej.

2. Obliczenia wytrzymałościowe z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych konstrukcji wariantów rozwojowych 120 mm pocisków APFSDS-T z wybranymi wariantami rozwojowymi sabotu, uwzględniające minimalizację jego masy

2.1. Wariant II

Na rys. 1 przedstawiono model obliczeniowy według wariantu II z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim. Na rys. 2 zaprezentowano rozkład naprężeń zredukowanych podczas strzału dla elementów tego pocisku z sabotem wykonanym z stopu aluminium 7075-T651.

Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości od około 80 mm za tuleją łączącą do końca połączenia penetrator-sabot: 1864 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w przedniej części połączenia tulei z sabotem na powierzchni sabotu: 3471 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym

numerical simulations

1. Introduction

Basing on the analysis of results presented in the first part of the publication it was assumed that 7075-T651 aluminium alloy has the best properties among the selection of 7075 alloys. The reduced stresses of overall structural connection between the penetrator and sabot do not exceed 2300 MPa for this alloy. Regarding the received level of simulated stresses a structural modification has to be made for this option. The objective of this modification is the reduction of maximal reduced stresses to the initially assumed safety level of 2000 MPa [1-14]. Results received for the basic option are the referential values which are used for further analyses of projectile developing options and their results are presented below.

2. Strength Calculations by Finite Elements Method for Developing Options of 120 mm APFSDS-T Projectile Designs at Selected Developing Options of Sabots Reducing Its Mass

2.1. Option II

Fig. 1 shows a calculating model according to option II with the penetrator elongated by 60 mm in the frontal segment. Fig. 2 shows a pattern of reduced stresses occurring at firing for components of the projectile with the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy.

The main concentrations of stresses in the penetrator occur at the distance of ca. 80 mm behind the connecting sleeve up to the end of the penetrator-sabot joining: 1864 MPa. The greatest local stress occurred on the surface of sabot at points of its connection with the sleeve: 3471 MPa. The stresses at the frontal

przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 910 MPa i 1520 MPa.

and rear critical cross sections were respectively 910 MPa and 1520 MPa.

Rys. 1. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T wg wariantu II z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim

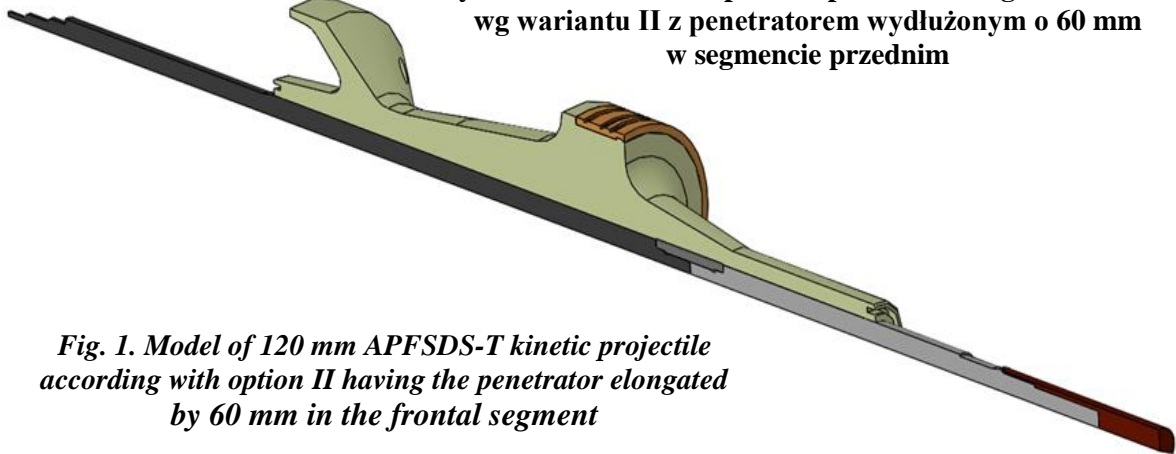
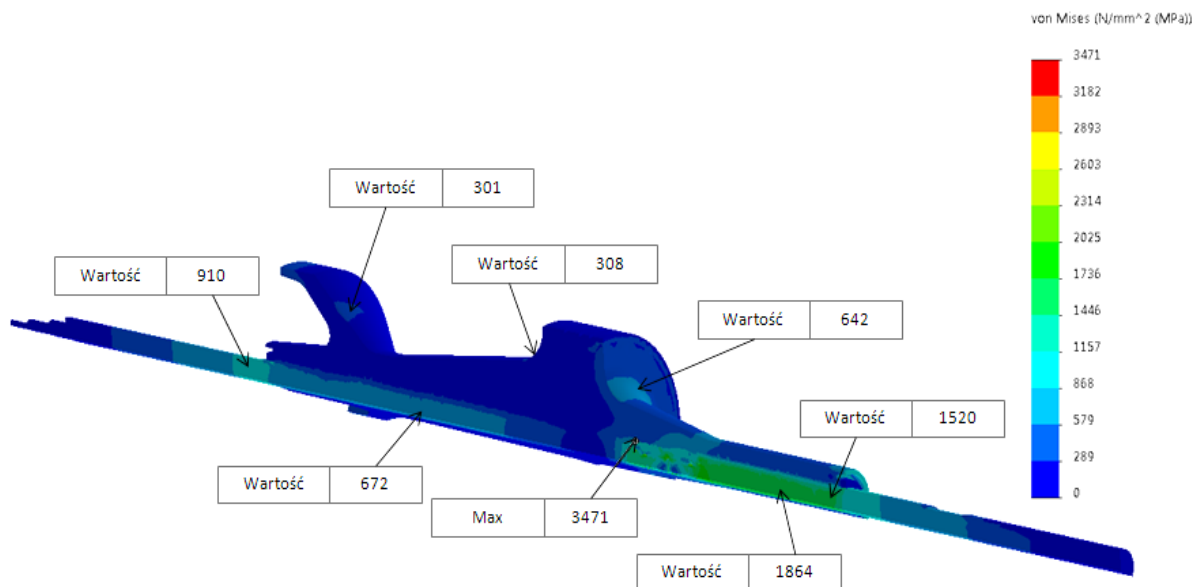


Fig. 1. Model of 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option II having the penetrator elongated by 60 mm in the frontal segment



Rys. 2. Naprężenia zredukowane w wariantcie II 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim dla materiału sabotu stop aluminium 7075-T651

Fig. 2. Reduced stresses for 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option II having the penetrator elongated by 60 mm in the frontal segment and the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy

Wyężenie materiału sabotu (7075-T651) według hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

- 1) 642 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą.

W tym miejscu składowa osiowa naprężen σ_z osiąga wartość 293 MPa (rozciąganie),

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

- 1) 642 MPa in the place of transition between the rear part of sabot and the supporting shelf. The axial component of stresses σ_z has value 293 MPa

składowa promieniowa naprężeń σ_r osiąga wartość 278 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń σ_ϕ osiąga wartość 262 MPa. Składowa naprężeń tnących τ_{rz} osiąga wartość -367 MPa.

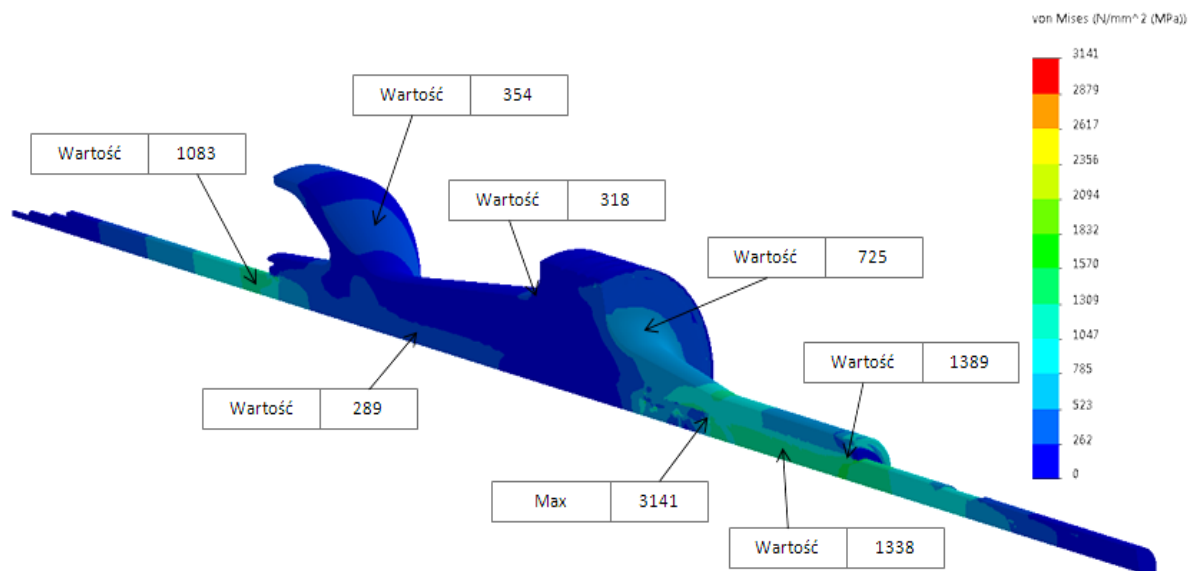
- 2) 308 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń σ_z osiąga wartość -312 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężeń σ_r osiąga wartość -124 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń σ_ϕ osiąga wartość -109 MPa. Składowa naprężeń tnących τ_{rz} osiąga wartość -143 MPa.

Na rysunku 3 zaprezentowano rozkład naprężeń zredukowanych podczas strzału dla elementów tego pocisku z sabotem wykonanym z kompozytu C-C.

(tension) in this place, the stress radial component σ_r is 278 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is 262 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -367 MPa.

- 2) 308 MPa on the second side of the rear shelf. In this place the stress axial component σ_z is -312 MPa (compression), the stress radial component σ_r is -124 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is -109 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -143 MPa.

Fig. 3 shows the pattern of reduced stresses at firing for components of the projectile having the sabot made of C-C composite.



Rys. 3. Naprężenia zredukowane w wariancie II 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim dla materiału sabotu kompozyt C-C

Fig. 3. Reduced stresses for 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option II having the penetrator elongated by 60 mm in the frontal segment and the sabot made of C-C composite

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

- 1) 725 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń σ_z

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

- 1) 725 MPa in the place of transition between the rear part of sabot and the supporting shelf. The axial component

osiąga wartość 363 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężeń $\bar{\sigma}_r$ osiąga wartość 313 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń $\bar{\sigma}_\varphi$ osiąga wartość 315 MPa. Składowa naprężeń tnących τ_{rz} osiąga wartość -401 MPa.

- 2) 318 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń $\bar{\sigma}_z$ osiąga wartość -192 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężeń $\bar{\sigma}_r$ osiąga wartość -118 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń $\bar{\sigma}_\varphi$ osiąga wartość -115 MPa. Składowa naprężeń tnących τ_{rz} osiąga wartość -136 MPa.

Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w okolicy końca połączenia penetrator - sabot: 1338 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w tylnej części połączenia tulei z sabotem na powierzchni sabotu: 3141 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1083 MPa i 1389 MPa.

Podsumowanie wariantu II

Wydłużenie penetratora o 60 mm z 620 mm do 680 mm ma celu zwiększenie penetracji 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T. Niestety z otrzymanych wyników symulacji wytrzymałościowej wynika, że zarówno dla sabotu wykonanego ze stopu aluminium 7075-T651 jak i kompozytu C-C naprężenia zredukowane w połączeniu kształtowym pomiędzy penetratorem i sabotem przekraczają 3000 MPa. Wariant ten wymaga modyfikacji konstrukcyjnej sabotu w celu obniżenia wartości naprężeń maksymalnych. Celem modyfikacji przeprowadzonej w kolejnym wariantcie (wariant III) jest obniżenie wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych do wcześniej założonego poziomu bezpieczeństwa: 2000 MPa.

2.2. Wariant III

Na rysunku 4 przedstawiono model obliczeniowy według wariantu III z penetratorem

of stresses $\bar{\sigma}_z$ is 363 MPa (tension) in this place, the stress radial component $\bar{\sigma}_r$ is 313 MPa, and the stress perimeter component $\bar{\sigma}_\varphi$ is 315 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -401 MPa.

- 2) 318 MPa on the second side of the rear shelf. In this place the stress axial component $\bar{\sigma}_z$ is -192 MPa (compression), the stress radial component $\bar{\sigma}_r$ is -118 MPa, and the stress perimeter component $\bar{\sigma}_\varphi$ is -115 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -136 MPa.

The main concentrations of stresses in the penetrator occur at the end of joining between penetrator and sabot: 1338 MPa. The greatest local stress occurred on the surface of sabot at sleeve rear points connecting to it: 3141 MPa. The stresses at the frontal and rear critical cross sections of the core were respectively 1083 MPa and 1389 MPa.

Summary of option II

Extension of the penetrator by 60 mm, from 620 mm to 680 mm was made to increase the penetration of 120 mm APFSDS-T kinetic energy projectile. Unfortunately the received results of strength simulation indicate that for the sabot made both of 7075-T651 aluminium alloy and C-C composite the reduced stresses of the profile joining between the penetrator and sabot exceed 3000 MPa. This option requires a structural modification to be made on the sabot design to reduce the maximal stresses. The modifications introduced into the next option (option III) are aimed to lower the maximal reduced stresses to the initially accepted safety level: 2000 MPa.

2.2. Option III

Fig. 4 shows the calculating model of option III with the penetrator extended by

wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim oraz dopasowanym sabotem w celu obniżenia naprężeń. Obliczenia podobnie jak w wariantcie II wykonano dla sabotu ze stopu aluminium 7075-T651 oraz kompozytu C-C.

60 mm in the frontal segment and the sabot refitted for reduction of stresses. The calculations were made similarly as for the option II both for aluminium 7075-T651 alloy and C-C composite sabots.

Rys. 4. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T wg wariantu III z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim oraz dopasowanym sabotem

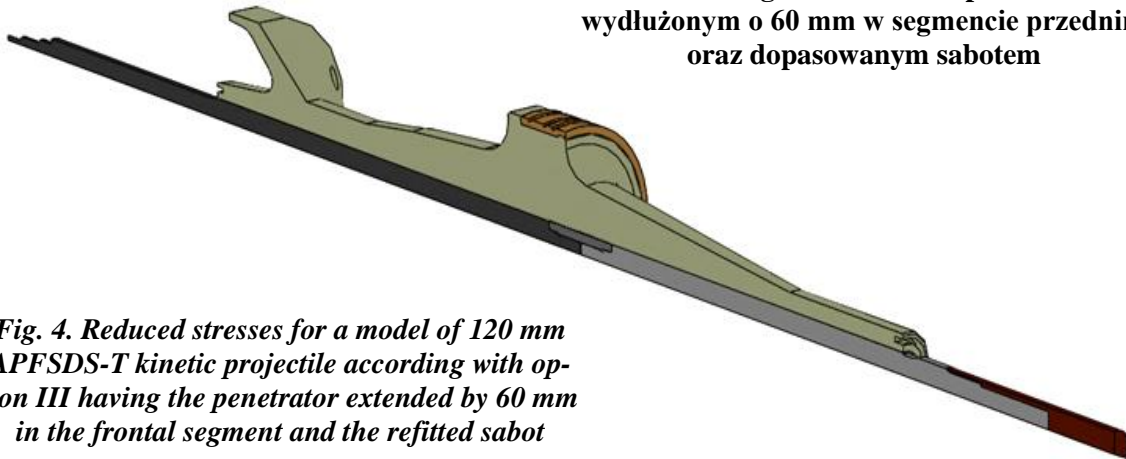


Fig. 4. Reduced stresses for a model of 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option III having the penetrator extended by 60 mm in the frontal segment and the refitted sabot

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises w momencie strzału dla pocisku etatowego z sabotem wykonanym ze stopu aluminium 7075-T651. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 130 mm za tuleją: 1341 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w tylnej części połączenia tulei z sabotem na powierzchni sabotu: 1631 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 813 MPa i 1118 MPa.

Wytyżenie materiału sabotu (stop aluminium 7075-T651) według hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

- 1) 567 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą.

W tym miejscu składowa osiowa naprężeń σ_z osiąga wartość 153 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężeń σ_r osiąga wartość 199 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń σ_ϕ osiąga wartość 200 MPa. Składowa naprężeń tnących τ_{rz} osiąga wartość -321 MPa.

Fig. 5 shows the pattern of reduced stresses according with von Mises' hypothesis occurring at a firing of the basic projectile with the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy. The main concentrations of stresses in the penetrator occur at the distance of ca. 130 mm behind the sleeve: 1341 MPa. The greatest local stress occurred on the surface of sabot at sleeve rear connection points to it: 1631 MPa. The stresses at the frontal and rear critical cross sections of the core were respectively 813 MPa and 1118 MPa.

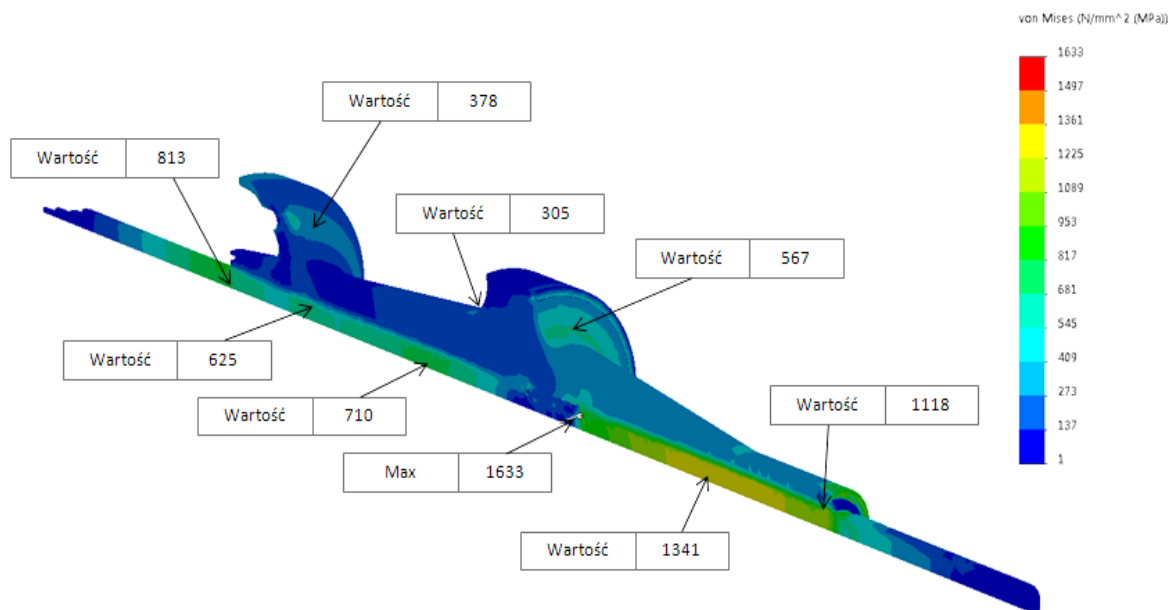
Reduced stresses of sabot material (7075-T651 aluminium alloy) according with von Mises' hypothesis for critical cross sections were:

- 1) 567 MPa in the place of transition between the rear part of sabot and the supporting shelf. The axial component of stresses σ_z has value 153 MPa (tension) in this place, the stress radial component σ_r is 199 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is 200 MPa. The stress shearing component

2) 305 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenie σ_z osiąga wartość -326 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężenie σ_r osiąga wartość -108 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenie σ_ϕ osiąga wartość -100 MPa. Składowa naprężenie tnących τ_{rz} osiąga wartość -131 MPa.

τ_{rz} is -321 MPa.

2) 305 MPa on the second side of the rear shelf. In this place the stress axial component σ_z is -326 MPa (compression), the stress radial component σ_r is -108 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is -100 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -131 MPa.



Rys. 5. Naprężenia zredukowane w wariantcie III 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim oraz dopasowanym sabotem wykonanym ze stopu aluminium 7075-T651

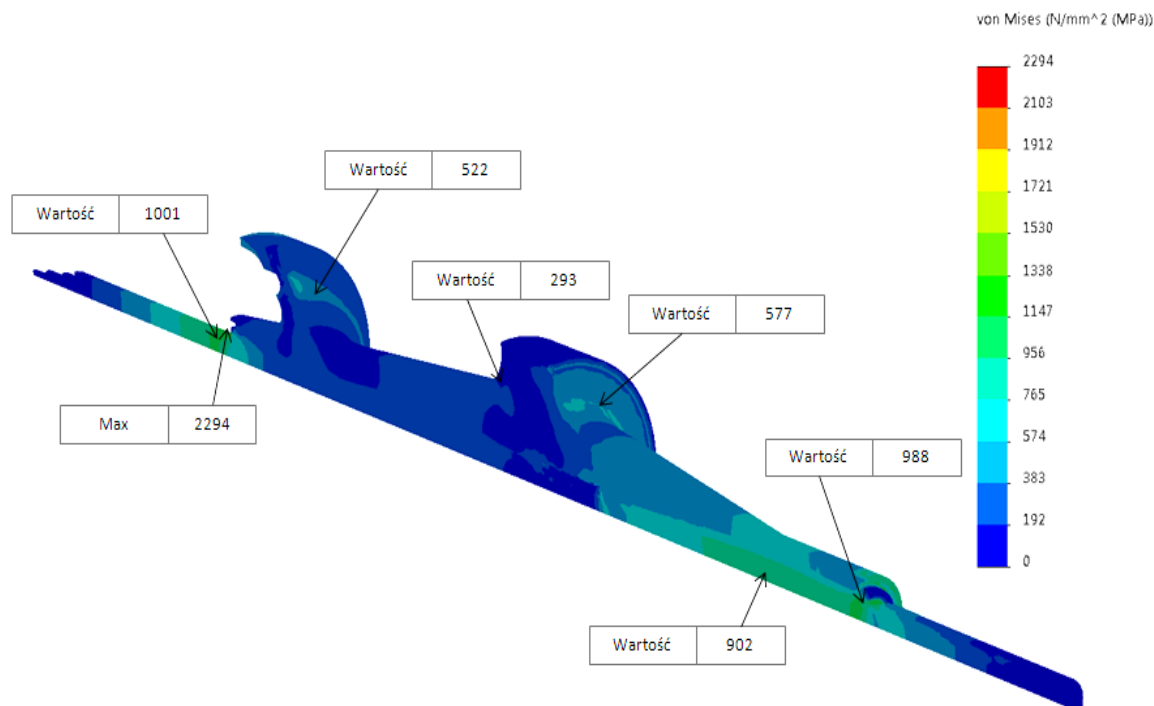
Fig. 5. Reduced stresses for 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option III having the penetrator extended by 60 mm in the frontal segment and the refitted sabot made of 7075-T651 aluminium alloy

Na rysunku 6 zaprezentowano rozkład naprężenia zredukowanych podczas strzału dla elementów tego pocisku z sabotem wykonanym z kompozytu C-C.

Główne koncentracje naprężenia w penetratorze występują w okolicy końca połączenia penetrator - sabot 1338 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w tylnej części połączenia tulei z sabotem na powierzchni sabotu 3141 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1083 MPa i 1389 MPa.

Fig. 6 shows the pattern of reduced stresses at firing for components of the projectile having the sabot made of C-C composite.

The main concentrations of stresses in the penetrator occur in the rear part of connection between penetrator and sabot: 1338 MPa. The greatest local stress occurred on the surface of sabot at sleeve rear connection points to it: 3141 MPa. The stresses at the frontal and rear critical cross sections of the core were respectively 1083 MPa and 1389 MPa.



Rys. 6. Naprężenia zredukowane w wariancie III 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T z penetratorem wydłużonym o 60 mm w segmencie przednim oraz dopasowanym sabotem wykonanym z kompozytu C-C

Fig. 6. Reduced stresses for 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option III having the penetrator extended by 60 mm in the frontal segment and the refitted sabot made of C-C composite

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

- 1) 577 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z osiąga wartość 175 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość 250 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia σ_ϕ osiąga wartość 253 MPa. Składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -331 MPa.
- 2) 293 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z osiąga wartość -288 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężenia σ_r ma wartość -108 MPa, a składowa obwodowa naprężenia σ_ϕ wartość -68 MPa. Składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -134 MPa.

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

- 1) 577 MPa in the place of transition between the rear part of sabot and the supporting shelf. The axial component of stresses σ_z is 175 MPa (tension) in this place, the stress radial component σ_r is 250 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is 253 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -331 MPa.
- 2) 293 MPa on the second side of the rear shelf. In this place the stress axial component σ_z is -288 MPa (compression), the stress radial component σ_r is -108 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is -68 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -134 MPa.

Podsumowanie wariantu III

Dopasowanie kształtu sabotu do wydłużonego penetratora zdecydowanie poprawiło rozkład naprężeń w połączeniu penetrator-sabot oraz obniżyło maksymalne zredukowane naprężenia zarówno dla sabotu wykonanego ze stopu aluminium 7075-T651 jak i kompozytu C-C. Dla materiału 7075-T651 naprężenia zredukowane pomiędzy wariantem II a III obniżyły się o połowę i nie przekraczają umownej granicy bezpieczeństwa 2000 MPa. Tak znacząca redukcja naprężeń umożliwiła przeprowadzenie kolejnej modyfikacji konstrukcji w celu obniżenia masy sabotu, przy zachowaniu tych samych kryteriów wytrzymałościowych.

W sabocie wykonanym z kompozytu C-C spadek naprężeń zredukowanych nastąpił głównie w tylnej części połączenia penetrator-sabot (spadek o około 30%). W przedniej części połączenia wciąż występują lokalne naprężenia przekraczające umowną granicę bezpieczeństwa. W dalszej modyfikacji konstrukcji, w pierwszym etapie należy przekonstruować obszary, które zagrażają bezpieczeństwu zaprojektowanej konstrukcji. Po uzyskaniu zadowalających wyników będzie można przejść do ewentualnej redukcji masy sabotu.

2.3. Wariant IV

Wyniki uzyskane w wariacie III sugerują, że dalsze modyfikacje konstrukcyjne powinny zostać przeprowadzone, w obszarze pomiędzy półkami prowadzącymi sabotu (redukcja zbędnej masy) niezależnie dla poszczególnych materiałów. W pierwszej części tego punktu omówiono wariant z sabotem wykonanym ze stopu aluminium, natomiast w drugim z kompozytu C-C.

2.3.1. Sabot wykonany ze stopu aluminium 7075-T651

Summary of option III

Matching the sabot profile to the extended penetrator has improved decisively the pattern of stresses in the joint of penetrator-sabot and lowered the maximal reduced stresses both for the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy and C-C composite. For material 7075-T651 the reduced stresses were two times lower in option III comparing to option II and are below the accepted safety level 2000 MPa. Such significant reduction of stresses enabled introduction of a consecutive modification of the design aimed to lower the mass of sabot at maintaining the same level of strength specifications.

The sabot made of C-C composite shows a decrease of reduced stresses mainly for the rear part of the joint penetrator-sabot (decrease by ca. 30%). In the frontal part of the joint there are still local stresses exceeding the accepted level of safety. Any further modifications of the design have to redesign the areas of threatened safety. Possible reduction of sabot mass may be conducted when the satisfactory results are received.

2.3. Option IV

The results received for option III suggest that next structural modifications have to be made in the areas between the sabot sliding shelves (removal of redundant mass) independently for the particular type of material. An option of the sabot made of aluminium alloy is presented in the first part of this chapter and the second part deals with sabot made of C-C composite.

2.3.1. Sabot made of 7075-T651 aluminium alloy

Rys. 7. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T wg wariantu IV z sabotem wykonanym ze stopu aluminium 7075-T651

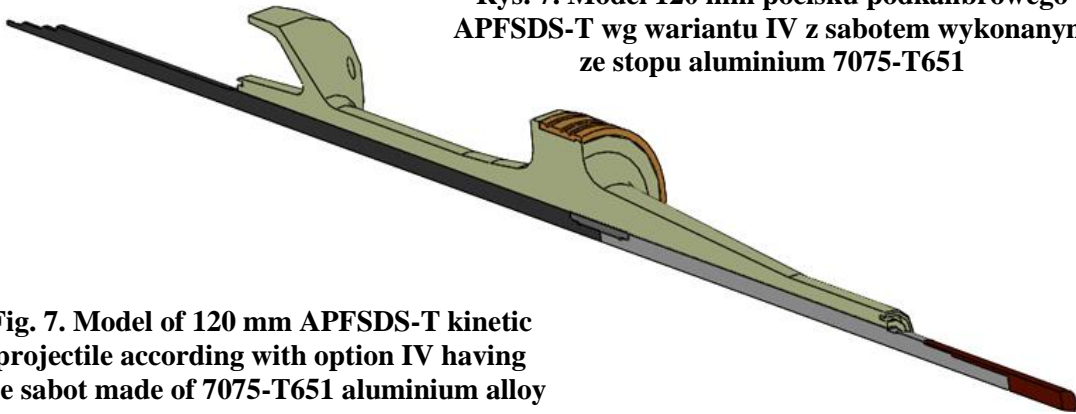


Fig. 7. Model of 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option IV having the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy

Na rysunku 8 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych wg hipotezy von Mises w momencie strzału dla pocisku wg wariantu IV z sabotem wykonanym ze stopu aluminium 7075-T651. Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości około 155 mm za tuleją 1500 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w tylnej części połączenia tulei z sabotem na powierzchni sabotu 1995 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 931 MPa i 1223 MPa.

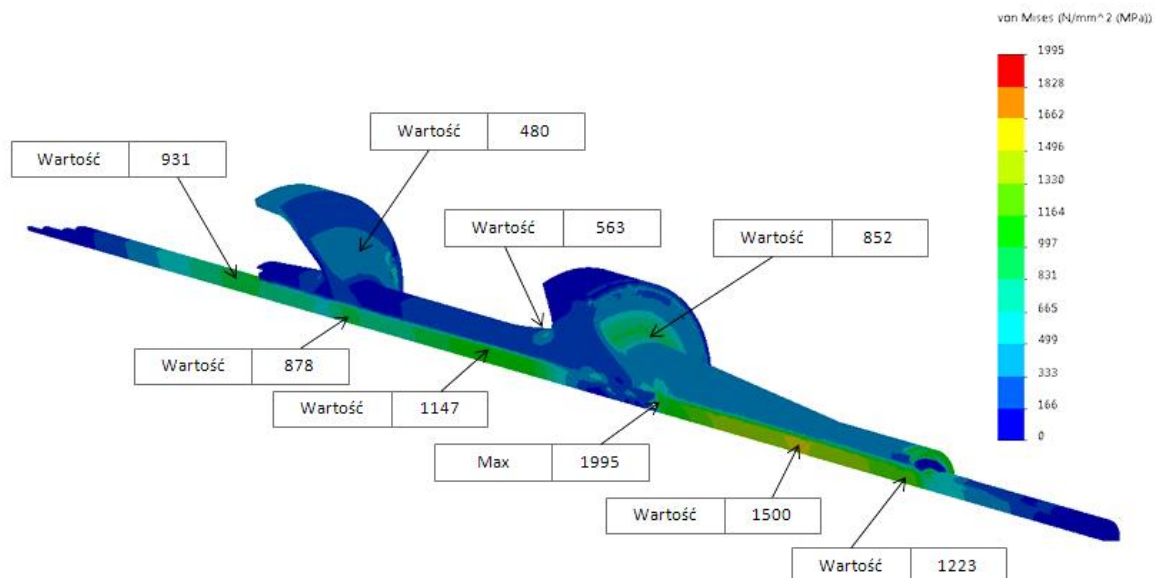
Wytyżenie materiału sabotu (stop aluminium 7075-T651) wg hipotezy von Mises w przekrojach niebezpiecznych wyniosło:

- 1) 852 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z osiąga wartość 416 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość 370 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia σ_φ osiąga wartość 392 MPa. Składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -479 MPa.
- 2) 563 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z osiąga wartość -531 MPa (ściskanie), składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość -319 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenia σ_φ osiąga wartość -318 MPa. Składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -289 MPa.

Fig. 8 shows the pattern of reduced stresses at firing the projectile according to option IV and the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy. The main concentrations of stresses in the penetrator occur at the distance of ca. 155 mm behind the sleeve: 1500 MPa. The greatest local stress occurred on the surface of the sabot at sleeve rear connection points to it: 1995 MPa. The stresses at the frontal and rear critical cross sections of the core were respectively 931 MPa and 1223 MPa.

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

- 1) 852 MPa in the place of transition of the rear part of sabot into the supporting shelf. The axial component of stresses σ_z is 416 MPa (tension) in this place, the stress radial component σ_r is 370 MPa, and the stress perimeter component σ_φ is 392 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -479 MPa.
- 2) 563 MPa on the second side of the rear shelf. In this place the stress axial component σ_z is -531 MPa (compression), the stress radial component σ_r is -319 MPa, and the stress perimeter component σ_φ is -318 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -289 MPa.



Rys. 8. Naprężenia zredukowane w wariantcie IV 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T z sabotem wykonanym ze stopu aluminium 7075-T651

Fig. 8. Reduced stresses for 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option IV having the sabot made of 7075-T651 aluminium alloy

Wprowadzone optymalizacje konstrukcji pozwoliły uzyskać spadek masy sabotu o 25,3% z 4,159 kg do 3,107 kg. W dalszej części pracy przedstawiono wpływ tych zmian na przebijalność pocisku oraz porównanie z podstawową wersją pocisku.

Applied optimisations decreased the mass of sabot by 25.3% from 4.159 kg to 3.107 kg. The following chapters of the paper show the impact of these changes into the penetrating capacities of the projectile and the comparison with the basic option of the projectile.

2.3.2. Sabot wykonany z kompozytu C-C

2.3.2. Sabot made of C-C composite

Rys. 9. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T wg wariantu IV z sabotem wykonanym z kompozytu C-C

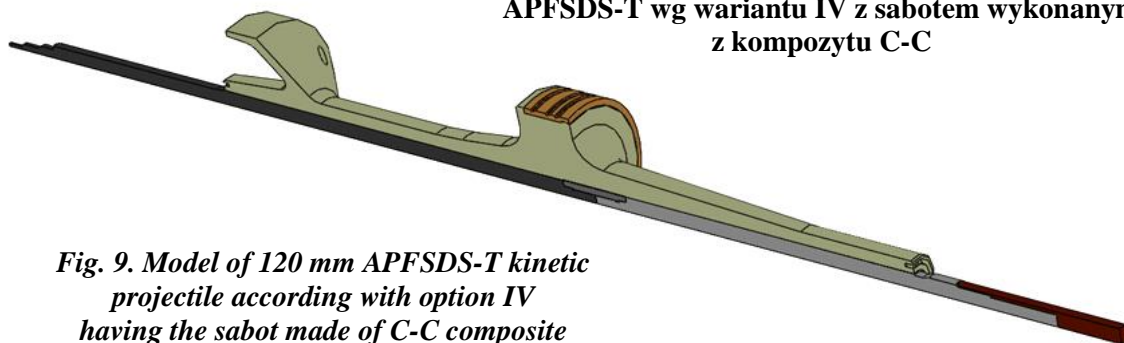
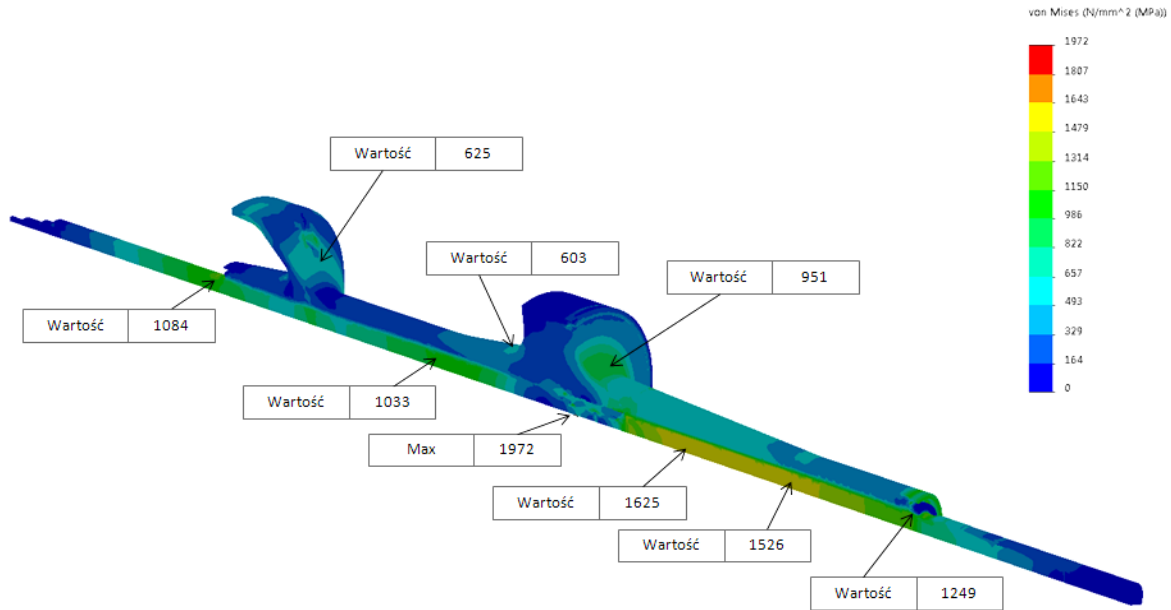


Fig. 9. Model of 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option IV having the sabot made of C-C composite

Na rysunku 10 zaprezentowano rozkład naprężeń zredukowanych podczas strzału dla elementów tego pocisku z sabotem wykonanym z kompozytu C-C.

Fig. 10 shows the pattern of reduced stresses at firing for projectile components with the sabot made of C-C composite.



Rys. 10. Naprężenia zredukowane w wariancie IV 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T z sabotem wykonanym z kompozytu C-C

Fig. 10. Reduced stresses for 120 mm APFSDS-T kinetic projectile according with option IV having the sabot made of C-C composite

Główne koncentracje naprężeń w penetratorze występują w odległości od około 75 mm do 145 mm za tuleją 1625 MPa. Największe punktowe naprężenie wystąpiło w tylnej części połączenia tulei z sabotem na powierzchni sabotu 1972 MPa. Naprężenia w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosły odpowiednio 1084 MPa i 1249 MPa.

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

- 1) 603 MPa w miejscu przejścia tylnej części sabotu w półkę podpierającą. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń σ_z osiąga wartość 540 MPa (rozciąganie), składowa promieniowa naprężeń σ_r osiąga wartość 392 MPa, zaś składowa obwodowa naprężeń σ_ϕ osiąga wartość 418 MPa. Składowa naprężeń tnących τ_{rz} osiąga wartość -529 MPa.
- 2) 951 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężeń σ_z osiąga wartość -588 MPa (ściska-

The main concentrations of stresses in the penetrator occur at distances from ca. 75 mm to 145 mm behind the sleeve: 1625 MPa. The greatest local stress occurred on the surface of the sabot at sleeve rear connection points to it: 1972 MPa. The stresses at the frontal and rear critical cross sections of the core were respectively 1084 MPa and 1249 MPa.

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

- 1) 603 MPa in the place of transition of the rear part of sabot into the supporting shelf. The axial component of stresses σ_z is 540 MPa (tension) in this place, the stress radial component σ_r is 392 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is 418 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -529 MPa.
- 2) 951 MPa on the second side of the rear shelf. In this place the stress axial component σ_z is -588 MPa (compress-

nie), składowa promieniowa naprężenie σ_r osiąga wartość -346 MPa, zaś składowa obwodowa naprężenie σ_ϕ osiąga wartość -361 MPa. Składowa naprężenie tnących τ_{rz} osiąga wartość -318 MPa.

Wprowadzone optymalizacje konstrukcji pozwoliły uzyskać spadek masy sabotu o 19,5% z 2,744 kg do 2,209 kg. Podobnie jak dla wariantu z sabotem ze stopu aluminium w dalszej części pracy przeprowadzono obliczenia, które określają wpływ zastosowanych zmian na penetrację pocisku oraz porównano z wersją podstawową pocisku.

3. Obliczenia analityczne parametrów balistyki końcowej 120mm pocisków APFSDS-T z wybranymi wariantami sabotu

Najważniejszym parametrem pocisków podkalibrowych jest ich zdolność do pokonywania pancerza - tzw. przebijalność. W niniejszym rozdziale przeprowadzono obliczenia mające na celu sprawdzenie jak zmiany konstrukcyjne pocisku, zaproponowane w poszczególnych wariantach w rozdziale 2, wpłynęły na penetrację.

3.1. Metoda szacowania głębokości penetracji

W celu teoretycznego wyliczenia głębokości penetracji dla poszczególnych wariantów wykorzystano wzór na przebicie dla pocisków rdzeniowych o stabilizacji brzechwowej [15]:

$$p = d * a \left(\frac{l}{d} \right) * (\cos\theta)^{0,745} * \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t} * e^{\frac{-25,9 * R_m}{p_p * v_u^2}}} \quad (3.1)$$

gdzie:

- p - głębokość penetracji [mm]
- d - Średnica rdzenia [mm]
- a - funkcja względnej długości
- l - długość rdzenia [mm]
- θ - kąt pochylenia płyty [°]

sion), the stress radial component σ_r is -346 MPa, and the stress perimeter component σ_ϕ is -361 MPa. The stress shearing component τ_{rz} is -318 MPa.

Introduced structural optimisations allowed for decreasing the mass of the sabot by 19.5% from 2.744 kg to 2.209 kg. In the following chapters of the paper the calculations are performed, similarly as for the option having the aluminium sabot, which identify the impact of introduced changes into the projectile penetrating capacities comparing to the projectile basic option.

3. Analytical Calculations of Terminal Ballistic Parameters for 120 mm APFSDS-T Projectiles and Selected Options of Sabots

The penetrating efficiency, or penetration, is the most important parameter of kinetic energy projectiles. The present chapter shows the calculations examining how the projectile structural changes proposed for particular options in chapter 2 have affected the penetration.

3.1. Penetration Depth Estimation Method

In order to calculate a theoretical depth of penetration for particular options the equation determining the penetration of fin stabilised rod projectiles was used [15]:

where:

- p - penetration depth [mm]
- d - diameter of the rod [mm]
- a - function of relative length
- l - length of the rod [mm]
- θ - plate inclination angle [°]

ρ_p - gęstość materiału rdzenia [kg/m³]
 ρ_t - gęstość materiału płyty [kg/m³]
 R_m - granica wytrzymałości płyty [MPa]
 V_u - prędkość penetratora w momencie uderzenia w cel [m/s].

Funkcja względnej długości opisana jest wzorem:

$$a * \left(\frac{l}{d}\right) = \frac{l}{d} + 3,77 * \left(1 - \tanh\left(\frac{\frac{l}{d} - 10}{6,89}\right)\right) \quad (3.2)$$

Do wyliczenia penetracji uprzednio należy obliczyć prędkość uderzenia w cel. W tym celu posłużono się metodą porównawczą uwzględniając zasadę zachowania energii.:

$$\varphi_e * q_e * V_e^2 = \varphi_p * q_p * V_p^2 \quad (3.3)$$

gdzie:

φ_e - współczynnik masy pozornej pocisku etatowego
 q_e - masa pocisku etatowego
 V_e - prędkość początkowa pocisku etatowego
 φ_p - współczynnik masy pozornej dla pocisku projektowanego
 q_p - masa pocisku projektowanego
 V_p - prędkość początkowa pocisku projektowanego

Przekształcając równanie zachowanie energii otrzymujemy:

$$V_p = \sqrt{\frac{\varphi_e * q_e * V_e^2}{\varphi_p * q_p}} \quad (3.4)$$

Wzór do wyliczenia współczynnika masy pozornej:

$$\varphi = 1,1 + \frac{1}{3} * \frac{\omega}{q} \quad (3.5)$$

ρ_p – density of the rod material [kg/m³]
 ρ_t – density of the plate [kg/m³]
 R_m – strength limit of the plate [MPa]
 V_u – penetrator’s velocity at the instant of hitting the target [m/s].

The function of relative length is expressed by:

The velocity of hitting the target has to be calculated before to get the penetration. For this reason the method of comparison regarding the principle of energy conservation was used:

where:

φ_e - coefficient of basic projectile apparent mass
 q_e - mass of the basic projectile
 V_e - muzzle velocity of the basic projectile
 φ_p - coefficient of the apparent mass for developed projectile
 q_p - mass of the developed projectile
 V_p - muzzle velocity of the developed projectile

After transformation of the energy conservation equation we can get:

The equation for calculation of the apparent mass coefficient is:

gdzie:

q – masa pocisku,

ω – masa ładunku prochowego

Założenia przyjęte do obliczeń:

1. Zakładając jednakową masę ładunku prochowego jak w pocisku etatowym, otrzymujemy identyczny współczynnik masy pozornej dla obu pocisków.
2. Jako pocisk etatowy został przyjęty polski pociski opracowany przez WITU 120 mm PZ 531 dla którego:

where:

q – mass of the projectile,

ω – mass of the powder charge

Assumptions taken for calculations:

1. Accepting the identical mass of the powder charge as in the basic projectile gives the same value of the apparent mass coefficient for two projectiles.
2. The Polish projectile 120 mm PZ531 developed by the Military Institute of Armament Technology was accepted as the basic one with:

$$V_e = 1650 \text{ [m/s]}$$

3. Zważając na podobieństwo konstrukcji w celu uproszczenia obliczeń przyjęto, że spadek prędkości na dystansie 2000 m będzie taki sam jak dla pocisku etatowego.

3. Regarding the similarity of designs and simplification of calculations it was assumed that the fall of velocity on the range of 2000 m is the same as for the basic projectile.

$$V_u = 1530 \text{ [m/s]}$$

A, więc:

And, then:

$$V_e - V_u = 1650 - 1530 = 120 \text{ [m/s]}$$

Upraszczając równanie o współczynniki masy pozornej otrzymano:

Simplification of the equation by the coefficients of the apparent mass gives:

$$V_p = \sqrt{\frac{q_e * V_e^2}{q_p}} \tag{3.6}$$

a, więc:

and, then:

$$V_u = \sqrt{\frac{q_e * V_e^2}{q_p}} - 120 \tag{3.7}$$

3.2. Obliczenia teoretyczne głębokości penetracji

3.2. Theoretical Calculations of Penetration Depth

Obliczenia penetracji wykonano dla:

Calculations of penetration were made for:

- 1) pocisk według wariantu I, materiał sabotu stop aluminium 7075-T651,
- 2) pocisk według wariantu I, materiał sa-

- 1) Projectile according to option I, sabot made of 7075-T651 aluminium alloy,
- 2) Projectile according to option I, sabot

botu kompozyt C-C,

- 3) pocisk według wariantu III, materiał sabotu stop aluminium 7075-T651,
- 4) pocisk według wariantu III, materiał sabotu kompozyt C-C,
- 5) pocisk według wariantu IV, materiał sabotu stop aluminium 7075-T651,
- 6) pocisk według wariantu IV, materiał sabotu kompozyt C-C.

Poniżej przedstawiono przykładowy tok obliczeniowy dla przypadku 3.

Dane użyte do obliczeń:

Średnica rdzenia: $d - 24$ [mm]

Długość rdzenia: $l - 680$ [mm]

Gęstość materiału rdzenia: $\rho_p - 17,3$ [kg/m³]

Gęstość materiału płyty: $\rho_t - 7,8$ [kg/m³]

Masa pocisku: $q_p - 8,2$ [kg]

Masa pocisku etatowego: $q_e - 7,446$ [kg]

Prędkość początkowa pocisku etatowego:

$V_p - 1650$ [m/s]

Wytrzymałość płyty: $R_m - 800$ [MPa]

Obliczono prędkość początkową oraz prędkość w momencie uderzenia w cel:

made of C-C composite,

- 3) Projectile according to option III, sabot made of 7075-T651 aluminium alloy,
- 4) Projectile according to option III, sabot made of C-C composite,
- 5) Projectile according to option IV, sabot made of 7075-T651 aluminium alloy,
- 6) Projectile according to option IV, sabot made of C-C composite.

An exemplary procedure of calculations is presented below for the case No 3.

Data used for calculations:

Diameter of the rod: $d - 24$ [mm],

Length of the rod: $l - 680$ [mm],

Density of rod material: $\rho_p - 17.3$ [kg/m³],

Density of plate material: $\rho_t - 7.8$ [kg/m³],

Mass of the projectile: $q_p - 8.2$ [kg],

Mass of basic projectile: $q_e - 7.446$ [kg],

Muzzle velocity of basic projectile:

$V_p - 1650$ [m/s],

The strength of plate: $R_m - 800$ [MPa],

The velocities at the muzzle and at hitting the plate were calculated:

$$V_p = \sqrt{\frac{q_e * V_e^2}{q_p}} = \sqrt{\frac{7,446 * 1650^2}{8,2}} = 1572,4 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$V_e - V_u = 1572,4 - 120 = 1452,4 \text{ [m/s]}$$

Obliczono wartość funkcji **a**:

The value of function **a** was calculated:

$$a * \left(\frac{l}{d} \right) = \frac{680}{24} + 3,77 * \left(1 - \tanh \left(\frac{\frac{680}{24} - 10}{6,89} \right) \right) = 28,37$$

Podstawiając otrzymaną wartość obliczono teoretyczną głębokość penetracji:

Substitution of the received value gives the theoretical depth of penetration:

$$p = 24 * 28,37 * 1^{0,745} * \sqrt{\frac{17,3}{7,8} * e^{\frac{-25,9 * 800}{7,8 * 1452,4^2}}} = 540,25 \text{ [mm]}$$

W formie tabelarycznej oraz graficznej

The comparison of projectile masses,

zaprezentowano porównanie mas pocisków, prędkości początkowych i w momencie uderzenia w cel oraz penetrację dla poszczególnych rozważanych wariantów.

muzzle and target hitting velocities, and penetrations for particular considered options is presented in tabular and graphical forms.

Tabela 1. Porównanie mas pocisków dla poszczególnych wariantów

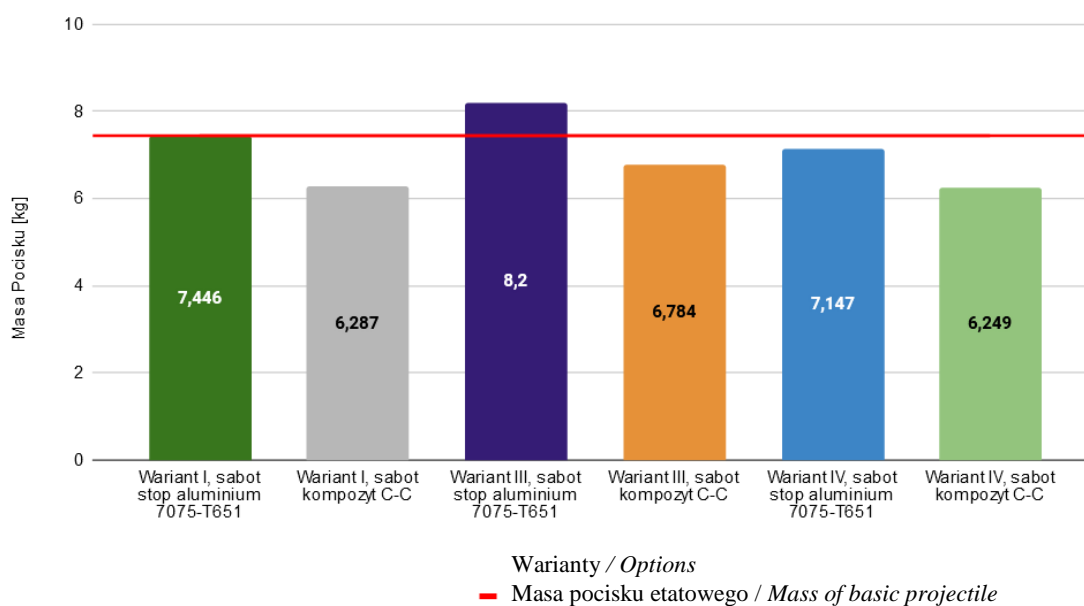
Table 1. Comparison of projectile masses for particular options

	Wariant I, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option I, sabot 7075- T651 alumin- ium alloy</i>	Wariant I, sabot kom- pozyt C-C <i>Option I, sabot C-C composite</i>	Wariant III, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option III, sabot 7075- T651 alumin- ium alloy</i>	Wariant III, sabot kom- pozyt C-C <i>Option III, sabot C-C composite</i>	Wariant IV, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option IV, sabot 7075- T651 alumin- ium alloy</i>	Wariant IV, sabot kompozyt C-C <i>Option IV, sabot C-C composite</i>
Masa pocisku <i>Projectile mass [kg]</i>	7,446	6,287	8,2	6,784	7,147	6,249
Masa pocisku w porównaniu do poci- sku etatowego <i>Projectile mass in reference to the basic projectile [%]</i>	100	84,43	110,12	91,11	95,99	83,92

Tabela 2. Porównanie prędkości początkowej i uderzenia dla poszczególnych wariantów

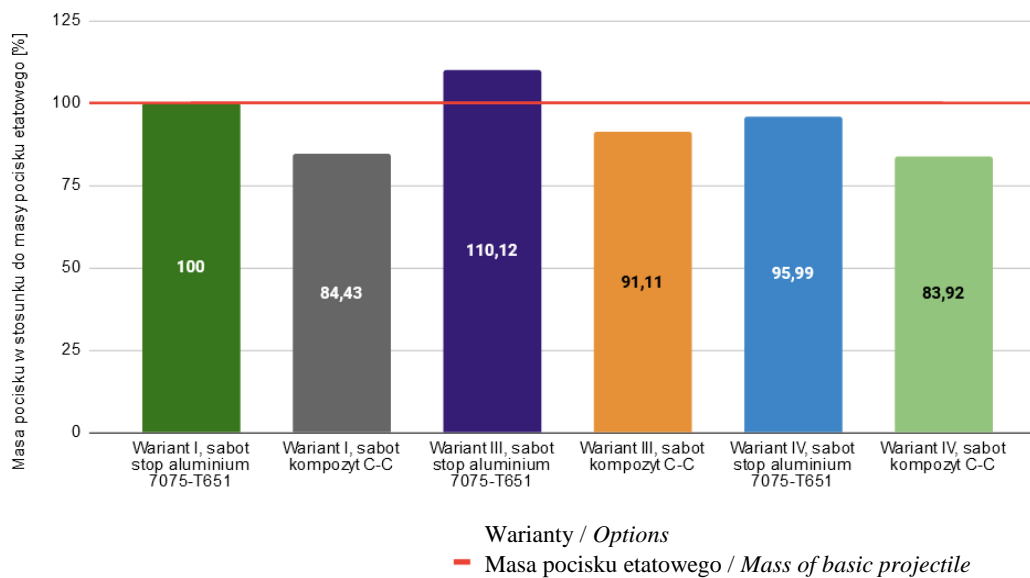
Table 2. Comparison of muzzle and hitting velocities for particular options

	Wariant I, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option I, sabot 7075- T651 alu- minium alloy</i>	Wariant I, sabot kom- pozyt C-C <i>Option I, sabot C-C composite</i>	Wariant III, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option III, sabot 7075- T651 alumin- ium alloy</i>	Wariant III, sabot kompozyt C-C <i>Option III, sabot C-C composite</i>	Wariant IV, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option IV, sabot 7075- T651 alumin- ium alloy</i>	Wariant IV, sabot kom- pozyt C-C <i>Option IV, sabot C-C composite</i>
Prędkość początkowa <i>Muzzle velocity [m/s]</i>	1650	1795,7	1572,4	1728,6	1684,2	1801,1
Prędkość w mo- mencie uderzenia w cel w odległości 2000 m <i>The velocity of hitting the target at 2000 m [m/s]</i>	1530	1675,7	1452,4	1608,6	1564,2	1681,1



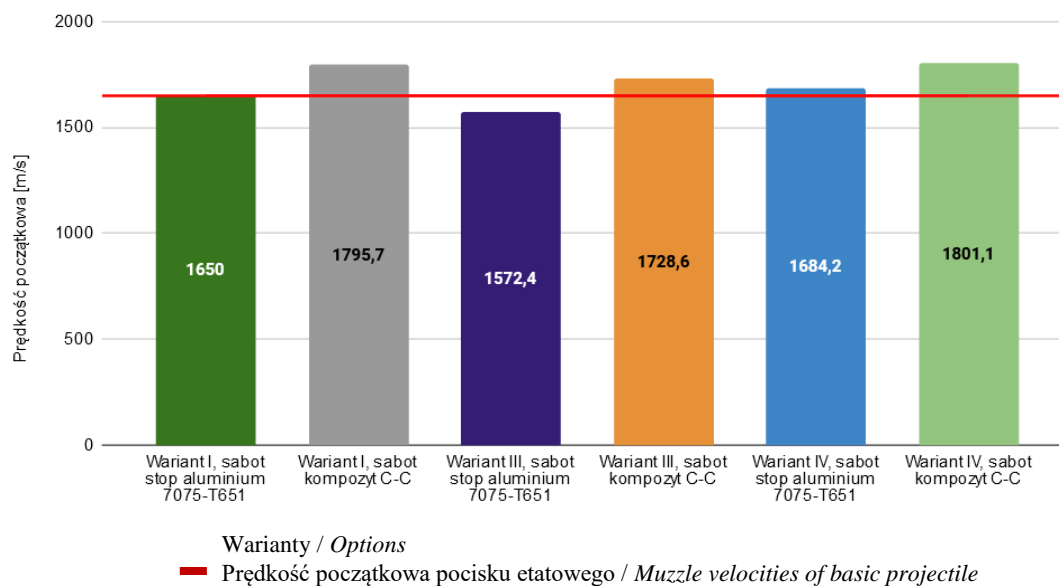
Rys. 11. Porównanie mas pocisków dla poszczególnych wariantów

Fig. 11. Comparison of projectile masses for particular options



Rys. 12. Porównanie mas pocisków w stosunku do masy pocisku etatowego

Fig. 12. Comparison of projectile masses to the mass of basic projectile



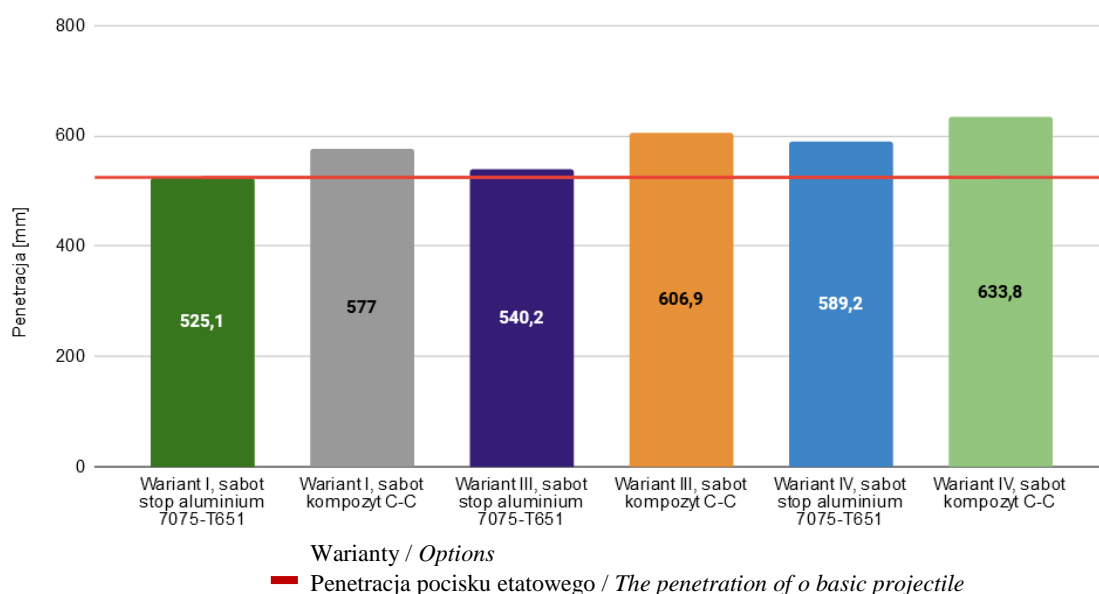
Rys. 13. Porównanie prędkości początkowej dla poszczególnych wariantów

Fig. 13. Comparison of muzzle velocities for particular options

Tabela 3. Porównanie wielkości penetracji pocisków dla poszczególnych wariantów

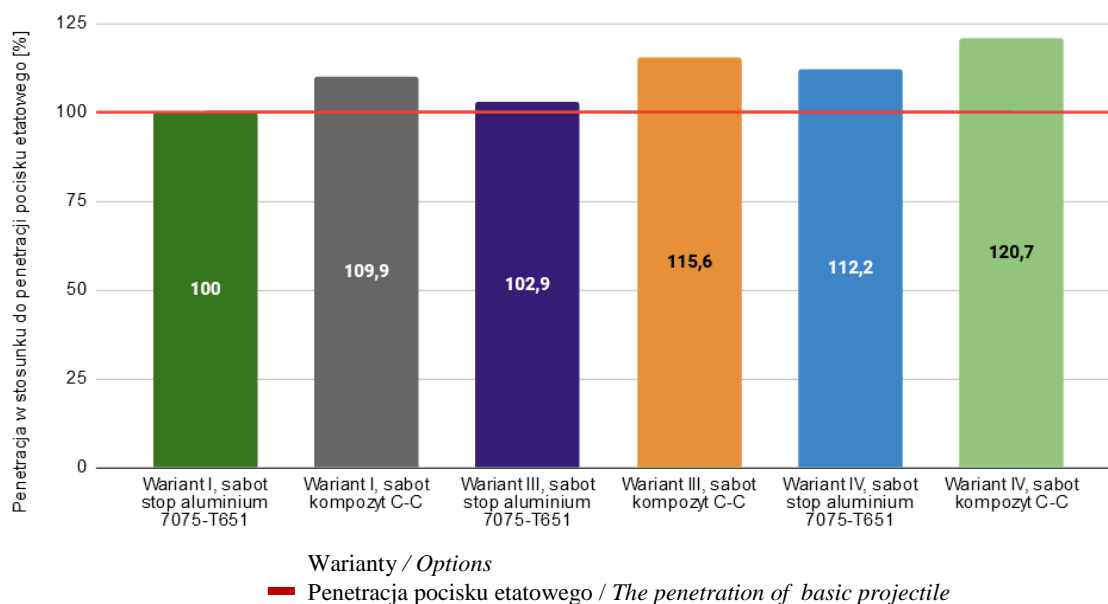
Table 3. Comparison of penetrations for particular options of projectiles

	Wariant I, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option I, sabot 7075-T651 aluminium alloy</i>	Wariant I, sabot kompozyt C-C <i>Option I, sabot C-C composite</i>	Wariant III, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option III, sabot 7075-T651 aluminium alloy</i>	Wariant III, sabot kompozyt C-C <i>Option III, sabot C-C composite</i>	Wariant IV, sabot stop aluminium 7075-T651 <i>Option IV, sabot 7075-T651 aluminium alloy</i>	Wariant IV, sabot kompozyt C-C <i>Option IV, sabot C-C composite</i>
Penetracja <i>Penetration [mm]</i>	525,1	577	540	606,9	589,2	633,8
Penetracja w porównaniu do pocisku etatowego <i>Penetration compared to the basic projectile [%]</i>	100	109,9	102,9	115,6	112,2	120,7



Rys. 14. Porównanie wielkości penetracji pocisków dla poszczególnych wariantów

Fig. 14. Comparison of penetration depth of projectiles for particular options



Rys. 15. Penetracja wariantu w stosunku do penetracji pocisku etatowego

Fig. 15. Penetration of the option referred to the penetration of the basic projectile

4. Wnioski końcowe

1. Analiza numeryczna wyników obliczeń wytrzymałościowych MES umożliwia sprawdzenie konstrukcji sabotu oraz określenie konkretnych obszarów wymagających modyfikacji na poszczególnych eta-

4. Final Conclusions

1. Analysis of numerical results of stress calculations by the Finite Elements Method (FEM) shows that it can be used for examination of sabot design and for pointing out specific areas

- pach pracy. Szybkie znalezienie błędów w konstrukcji pozwala zaoszczędzić czas i środki przeznaczone na budowę prototypu.
2. Na podstawie przeprowadzonej analizy MES stwierdzono, że dla konkretnych parametrów rdzenia (średnicy i długości) oraz ładunku miotającego (rodzaju prochu oraz jego masy), jedynym sposobem na zwiększenie prędkości początkowej pocisku jest ograniczenie „masy pasożytniczej”. W tym celu należy sabot konstruować tak, aby był jak najlżejszy przy zachowanej założonej wytrzymałości (przenoszeniu dynamicznych obciążeń występujących w lufie podczas strzału).
 3. Dominującymi materiałami wykorzystywanymi do produkcji sabotów są stopy metali oraz specjalne kompozyty węglowe. Penetracja pocisku z sabotem wykonanym z kompozytu C-C jest o ponad 100 mm większa od penetracji pocisków aktualnie używanych przez Wojsko Polskie. W celu dokładniejszej analizy wytrzymałościowej sabotu wykonanego z kompozytu C-C należy przeprowadzić analizę uwzględniającą poszczególne warstwy oraz kierunkowe ułożenie włókien kompozytu.
 4. Optymalizacja konstrukcji sabotu z wykorzystaniem metody elementów skończonych umożliwiła ograniczenie masy sabotu o 9% dla stopu aluminium 7075-T651 oraz o 35% dla kompozytu C-C w stosunku do sabotu pocisku etatowego. Przełożyło się to na redukcję masy całego pocisku (uwzględniając wydłużenie rdzenia o 60mm) o 4% i 16% oraz na wzrost penetracji o 12,2% i 20,7% odpowiednio dla stopu aluminium oraz kompozytu C-C.
- which have to be modified at particular stages of work. A quick finding of troubles in a design can be beneficial for saving the time and assets needed for building a prototype.
2. Basing on FEM analysis it was stated that for specific parameters of the core (diameter and length) and the projecting charge (type of the powder and its mass) a limitation of the “inefficient mass” is the only way for increasing the projectile muzzle velocity. For this reason the sabot has to be designed as light as possible at preserving the assumed strength (withstanding the dynamical loads occurring in the barrel at firing).
 3. The alloys of metals and special carbon composites dominate the materials used for production of sabots. Penetration of projectile having the sabot made of C-C composite is by more than 100 mm greater than currently used by the Polish Army. In order to get more detailed picture of stress resistance of the sabot made of C-C composite the studies have to be made on particular layers and directions of setting the composite fibres.
 4. Optimisation of sabot design by using the Finite Elements Method provided reduction of sabot mass by 9% for 7075-T651 aluminium alloy and by 35% for C-C composite comparing to the basic projectile. It was translated into the reduction of the overall projectile mass (accounting extension of the core by 60mm) by 4% and 16% and the increase of penetration by 12.2% and 20.7% respectively for the aluminium alloy and C-C composite.

Literatura / Literature

- [1] M. Magier, *Koncepcja czołgowego pocisku podkalibrowego nowej generacji o zwiększonej zdolności przebicia pancerzy współczesnych czołgów*, (2007), *Problemy Techniki Uzbrojenia*, nr 2, zeszyt 102, s. 69-80.

-
- [2] E. Włodarczyk, M. Magier, Analiza koncentracji osiowego naprężenia w rdzeniu wydłużonego pocisku podkalibrowego podczas strzału, (2004), Biuletyn WAT, 53 (2-3), 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), s.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, (2012), 26, 05005.
- [6] M. Magier, (2020) Wybrane problemy rozwoju kinetycznej amunicji przeciwpancernej, Wydawnictwo Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zielonka - 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. Journal 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 przebiccia pancerza RHA, (2008), Problemy Techniki Uzbrojenia, nr 3, zeszyt 107, s. 43-60
- [11] M. Magier, Koncepcja czołgowego pocisku podkalibrowego nowej generacji o zwiększonej zdolności przebiccia pancerzy współczesnych czołgów, (2007), Problemy Techniki Uzbrojenia, nr 2, zeszyt 102, s. 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., s. 468-474.
- [14] T. Błaszczak, Analiza własności materiałów konstrukcyjnych używanych na saboty pocisków podkalibrowych. Praca przejściowa magisterska, Warszawa 2020. Niepublikowane.
- [15] M. Magier, Metody oszacowania głębokości przebiccia pancerza przez pociski kinetyczne, (2007), Problemy Techniki Uzbrojenia, nr 1, zeszyt 101, s. 103-116.

