

KONCEPCJA CZOŁGOWEGO POCISKU PODKALIBROWEGO NOWEJ GENERACJI O ZWIĘKSZONEJ ZDOLNOŚCI PRZEBICIA PANCERZY WSPÓŁCZESNYCH CZOŁGÓW

Przedstawiono koncepcję możliwości zwiększenia zdolności niszczenia pancerzy współczesnych czołgów poprzez zastosowanie odpowiedniego rozwiązania konstrukcyjnego w postaci segmentowego penetratora do 120 i 125 mm pocisków typu APFSDS-T.

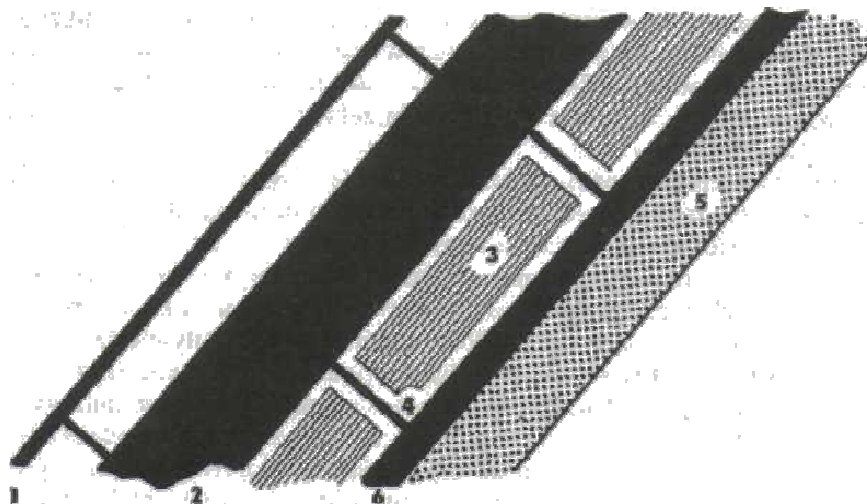
1. Wstęp

Na początku XXI wieku amunicja podkalibrowa jest podstawowym rodzajem amunicji przeciwpancernej stosowanej w uzbrojeniu czołgów. Stało się tak za sprawą kilku zasadniczych zalet tego rodzaju amunicji, a mianowicie: znacznych zdolności przebicia (500÷700 mm pancerza RHA – *Rolled Homogeneous Armour*) na odległości 2000 m, dużej prędkości początkowej i jej małemu spadkowi na torze lotu (55÷150 m/s na odległości 1000 m), warunkujących krótki czas lotu pocisku do celu (1,5÷2 s na odległość 2000 m), dużą celność (rozrzut średnio 0,25 mrad), małej wrażliwości na oddziaływanie pancerza reaktywnego, szokowe oddziaływania na załogę czołgu, wywołane udarem penetratora w pancerz. W konstrukcjach współczesnych czołgów najczęściej stosuje się pancerze kompozytowe, składające się z elementów stalowych i ceramicznych. Głębokość penetracji pancerza kompozytowego zadanej grubości przez klasyczny pocisk typu APFSDS-T z penetratorem wykonanym ze spieku na osnowie wolframowej jest mniejsza w porównaniu z pancerzem typu RHA (jednolitym wykonanym z stali pancerniej) o tej samej masie. Mechanizm zmniejszania zdolności penetracji przez pocisk podkalibrowy polega przede wszystkim na znacznie większej zdolności ceramiki do „tępienia” penetratora pocisku w fazie wnikania w pancerz.



Rys. 1. Brytyjski czołg *Challenger 1* z pancerzem kompozytowym *Chobham*

Aby uzyskać dużą odporność materiału pancerza na przebicie (przy ograniczonym względami konstrukcyjno-manewrowymi jego ciężarze) należy wykorzystać szereg materiałów o nowych właściwościach. Kompozycje ceramiczne i kompozyty z tworzyw sztucznych o dużej wytrzymałości mechanicznej i małym ciężarze stosuje się w wielu już produkowanych czołgach, podobnie jak pancerz warstwowy metalowo-ceramiczny. Pancerz taki składa się z płyt stali pancernej, pomiędzy którymi znajdują się płyty ceramiczne, najczęściej zatopione w elementach ze stopu aluminium. Ceramika charakteryzuje się wysoką temperaturą topnienia, co jest szczególnie ważne przy uzyskiwaniu odporności na przebicie strumieniem kumulacyjnym. Wysoka topliwość ma również znaczny wpływ na odporność na przebicie pociskiem podkalibrowym o dużej prędkości, który ma tak dużą energię, że w procesie penetracji zastosowanie mają głównie prawa hydrodynamiki - mniejsze znaczenie ma wytrzymałość mechaniczna materiału, natomiast większe jego masa (siły bezwładności), gęstość oraz właśnie temperatura topnienia [1]. Stosowane od około 20 lat pancerze stalowo-ceramiczne (tzw. Chobham), są do 2,8 raza odporniejsze na pociski kumulacyjne niż pancerze ze stali pancernej o takim samym ciężarze. Strukturę pancerza warstwowego i jego działanie przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przekrój przez typowy warstwowy pancerz laminowany: 1 — przedni ekran przeciwkumulacyjny, 2 — główna płyta stalowa, 3-elementy ceramiczne, 4 — odlewana kasetta ze stopu lekkiego, 5 — warstwa tworzywa sztucznego, 6 — wewnętrzna płyta stalowa

Po perforacji pierwszej płyty stalowej 2 przez pocisk kinetyczny, wewnętrzna płyta stalowa 6 (rys. 2) odbija falę sprężystą generowaną w pancerzu przez uderzający pocisk i zwraca ją do elementu ceramicznego w formie stożka. Zjawisko to powoduje dyssypację energii i pękanie elementu ceramicznego. Mechanizm pęknięcia elementów ceramiki powodowany skupioną energią kinetyczną może być powstrzymany także poprzez zastosowanie cienkiej plastycznej warstwy grafitu, naniesionej na powierzchni elementu ceramicznego, absorbującej część energii uderzenia [2]. Elementy ceramiczne pancerza warstwowego charakteryzują się wysoką impedancją falową I (zdolnością do rozpraszania energii kinetycznej pocisku uderzającego w pancerz) określaną zależnością:

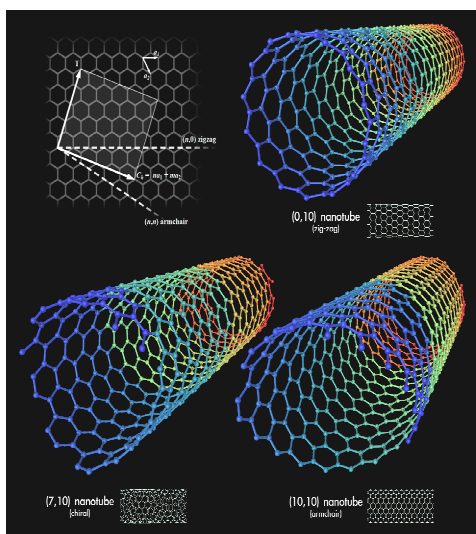
$$I = \rho c \quad (1)$$

gdzie: ρ - gęstość materiału ceramicznego pancerza (około 3200 kg/m^3), c - prędkość rozchodzenia się dźwięku w materiale ceramicznym (około 11500 m/s) [3].

Ze względu na małą odporność ceramiki na wielokrotne uderzenia pocisków kinetycznych (ze względu na jej udarowe kruszenie), elementy ceramiczne pancerza warstwowego charakteryzują się możliwie małymi gabarytami.

Obecny zaawansowany stan rozwoju technologii produkcji ceramiki „pancernej” pozwala na uzyskanie zwiększenia jej odporności na penetrację pięciokrotnie większą od odporności standardowej stali pancerniej o tej samej masie.

W pancerzach warstwowym najczęściej stosuje się kompozycję kilku rodzajów materiałów ceramicznych, a w najnowszych rozwiązaniach powlekanie materiałem CNTs (*carbon nanotubes*) pochodzącym od alotropowej odmiany węgla o bardzo wysokich własnościach wytrzymałościowych ($E \approx 1000$ GPa, $R_{02} \approx 63$ GPa). Szczególną własnością CNT jest zdolność tworzenia złożonych wiązań atomowych pod wpływem oddziaływania dużego ciśnienia, co zwiększa ich wytrzymałość.



Rys. 3. Struktura materiału CNT

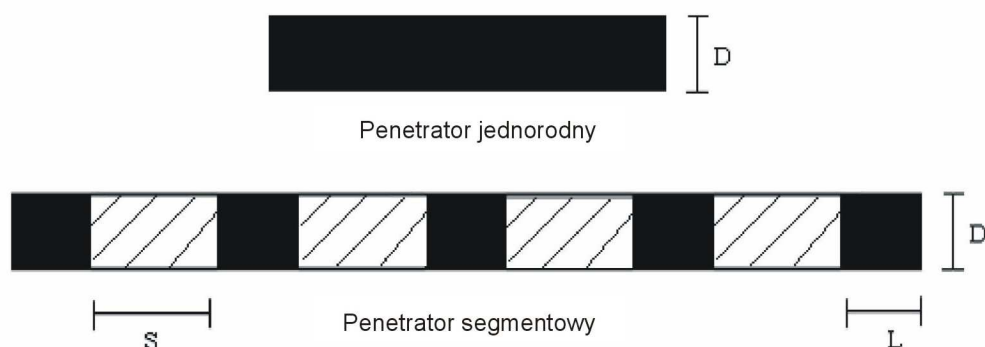
Obok stosowania kompozycji o jak najwyższych temperaturach topnienia, zamierza się to osiągnąć m.in. poprzez zastąpienie stali materiałami o porównywalnej wytrzymałości, lecz znacznie mniejszym ciężarze; jednym z takich materiałów jest kompozyt kevlarowy (jedynym współczesnym wozem bojowym z takim pancerzem jest brytyjski BWP *MCV-80 Warrior*). Charakteryzuje się on wysoką ceną, lecz pancerze kevlarowo-ceramiczne znajdują prawdopodobnie zastosowanie w wielu czołgach lekkich, w których ograniczenie ciężaru jest dodatkowo uzasadnione wymogami transportu powietrznego (1).

2. Koncepcja pocisku podkalibrowego o zwiększonej zdolności przebicia pancerza kompozytowego

Od kilkunastu lat prowadzone są w świecie intensywne prace nad zwiększaniem zdolności przebicia pancerza przez pociski podkalibrowe. Główny kierunek prac dotyczy optymalizacji konstrukcji pocisku podkalibrowego w celu osiągnięcia jak największej masy penetratora z ograniczoną średnicą (~25 mm) i jak najniższej masy sabotu z zachowaniem wytrzymałości konstrukcji i prawidłowego działania pocisku.

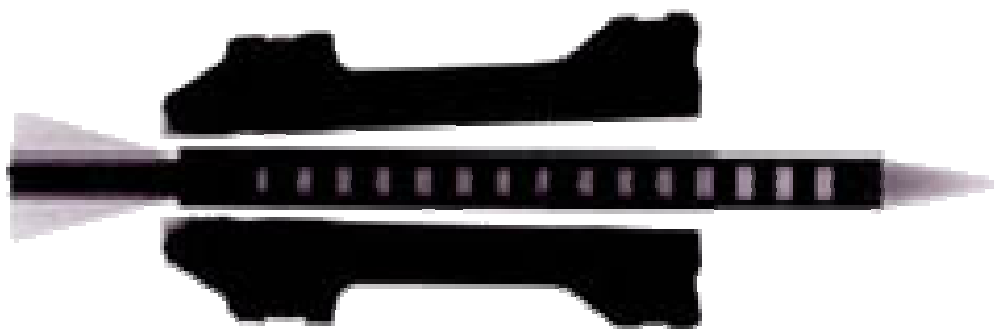
Jednym ze sposobów zwiększenia głębokości przebicia pancerza przez pociski kinetyczne jest zastosowanie penetratorów o budowie segmentowej (rys. 4). W teoretycznym założeniu tej konstrukcji segmenty penetratora zachowują wzajemne liniowe położenie względem

punktu uderzenia w pancerz kolejno penetrują pancerz. Taki sposób dostarczania energii kinetycznej do „układu penetracji” skutkuje mniejszymi stratami energii związanymi z inercyjnym hamowaniem penetratora w materiale pancerza, a w efekcie końcowym zwiększenie głębokości przebicia przez penetrator segmentowy w porównaniu do jednorodnego penetratora o tej samej masie i gabarytach.



Rys. 4. Schemat konstrukcji penetratora jednorodnego i segmentowego

Jednym z przykładów doświadczalnej konstrukcji pocisku podkalibrowego z penetratorem segmentowym jest model małowalibrowego pocisku typu APFSDS opracowany w Francusko-Niemieckim Instytucie Badawczym w Saint-Louis (rys.5).



Rys. 5. Model pocisku podkalibrowego o konstrukcji segmentowej opracowany w Instytucie Saint-Louis

Jednakże zjawisko zwiększania głębokości penetracji (o około 10%) penetratorem segmentowym w stosunku do penetratora jednorodnego o tych samych wymiarach i masie, zgodnie z dostępnymi wynikami symulacji i badań dynamicznych, zachodzi dla prędkości uderzenia w pancerz powyżej 2000 m/s. Dodatkowym ograniczeniem zastosowania penetratora wielosegmentowego jest jego wytrzymałość w czasie strzału. Jest to szczególnie trudne do spełnienia w przypadku penetratorów pocisków do armat czołgowych.

W modelu pocisku konstrukcji WITU, ze względu na ograniczenia dotyczące wytrzymałości pocisku w czasie strzału, przyjęto koncepcję penetratora pocisku APFSDS składającego się z dwóch segmentów wykonanych ze spieku na osnowie wolframowej połączonych tuleją wykonaną z materiału o wysokiej wytrzymałości (rys. 6).

Głównym celem zastosowania takiego rozwiązania konstrukcyjnego nie jest tylko zwiększenie zdolności przebicia pancerza jednorodnego, ale także zwiększenie zdolności przebicia pancerza niejednorodnego składającego się z płyt stalowych i elementów ceramicznych o analogicznej do przedstawionej na rysunku 2 budowie.

W założeniu teoretycznym segment przedni penetratora uderzającego w pancerz kompozytowy zużywa się w trakcie penetracji pierwszej zasadniczej warstwy pancerza (np. stal) w

trakcie stacjonarnego hydrodynamicznego procesu wnikania [4]. Zastosowanie tulei łączącej wykonanej z materiału o innej gęstości i wytrzymałości, pozwoli na znaczne zmniejszenie lub wyeliminowanie propagacji fali uderzeniowej (dzielącej się na fale sprężystą i plastyczną, które negatywnie wpływają na wytrzymałość penetratora poprzez generowanie m.in. deformacji plastycznych) w segmencie tylnym penetratora powstającej podczas etapu zderzenia pocisku z pancerzem. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania konstrukcyjnego nienaruszony strukturalnie segment tylny penetratora może penetrować z wynikiem pozytywnym drugą zasadniczą warstwę pancerza (np. element ceramiczny).



Rys. 6. Model penetratora o konstrukcji segmentowej pocisku podkalibrowego opracowany w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia

Powyższe rozwiązanie wymaga jednak, we wstępnym etapie optymalizacji konstrukcji penetratora, przeprowadzenia analiz wytrzymałościowych konstrukcji pocisku w czasie strzału oraz wykonania szeregu symulacji procesów penetracji penetratorem segmentowym pancerza jednorodnego i warstwowego w celu uzyskania możliwie najlepszych parametrów penetracji pancerzy współczesnych czołgów.

3. Analiza wytrzymałościowa wariantów rozwojowych pocisku z penetratorem segmentowym w warunkach strzału

Jako konstrukcję wyjściową przyjęto 120 mm pocisk typu APFSDS-T skonstruowany w WITU w ramach rodziny polskiej amunicji do czołgów LEOPARD 2 A4.

Symulacyjne obliczenia wytrzymałościowe przeprowadzono w następujących wariantach:

- Wariant I – pocisk z penetratorem o długości jednakowej jak w w/w 120 mm pocisku APFSDS-T, wykonanym z dwóch segmentów połączonych tuleją (rys. 6). Pocisk był już poddany badaniom strzelaniem w latach 2005-2006,
- Wariant II - pocisk z penetratorem o wydłużonym o 60 mm segmentem przednim,
- Wariant III - pocisk z penetratorem o wydłużonym o 60 mm segmentem przednim i zmodyfikowanym sabotem,
- Wariant IV - pocisk z penetratorem o wydłużonym o około 60 mm segmentem przednim, ze zmodyfikowanym sabotem i połączeniem kształtowym pomiędzy penetratorem i sabotem.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem dostępnego w WITU oprogramowania MES ANSYS 8.0 PL - moduł Design Space i przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

- zadanie wytrzymałościowe będzie rozpatrywane przy założeniu liniowych charakterystyk materiałowych i izotropowości materiału sabotu, penetratora i pierścienia uszczelniającego,
- przy założeniu osiowej symetrii geometrii sabotu przyjęto model obliczeniowy w formie wycinka wzdłużnego pocisku ograniczonego dwoma powierzchniami półprzekrojów, rozchylonymi względem siebie o kąt 120° ,
- modelowany wycinek pocisku jest ulokowany w układzie walcowym r, φ, z .
- oddziaływanie lufy na pocisk zamodelowano, przyjmując na powierzchniach styku przedniej i tylnej półki prowadzącej sabotu z lufą oraz na powierzchni styku pierścienia uszczelniającego z lufą podpory ciągle przesuwne,
- połączenie kształtowe sabotu i rdzenia ma charakter trwałego pełnego połączenia,

- tylną powierzchnię pocisku obciążono ciśnieniem gazów prochowych o wartości 327,8 MPa, odpowiadającej maksymalnemu ciśnieniu działającemu na pocisk w czasie strzału przy temperaturze ładunku miotającego 295 K (wyniki obliczeń uzyskane za pomocą programu do rozwiązania PGBW – PZB2),
- wszystkie elementy pocisku obciążono przyspieszeniem globalnym o wartości około 55000 g, równoważącym oddziaływanie ciśnienia gazów prochowych na pocisk.
- przyjęto liniowo-sprężystą charakterystykę własności wytrzymałościowych materiału sabotu (PA9), rdzenia (spiek na osnowie wolframowej) i pierścienia uszczelniającego (poliamid) co wystarcza do oszacowania zakresu obciążeń, przy których następuje uplastycznienie materiału. Wartości dynamicznych granic plastyczności materiałów konstrukcyjnych penetratora i sabotu wyznaczonych za pomocą testu Hopkinsona (wyniki badań przedstawiono w pracach [5] i [6]), przyjęto jako dopuszczalne wartości progowe naprężeń zredukowanych (H-M-H), po przekroczeniu, których może nastąpić zniszczenie materiału (tabela 1).

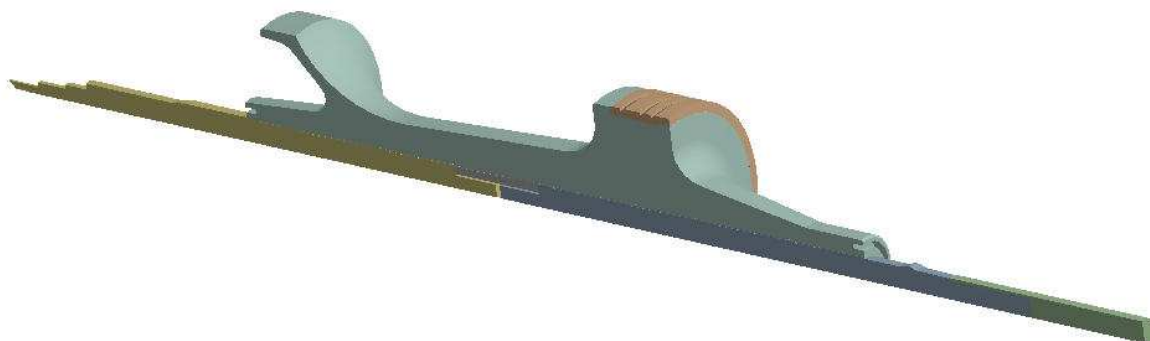
Tabela 1. W obliczeniach uwzględniono następujące dane materiałowe:

Materiał	gęstość (γ), g/cm ³	moduł Young'e'a (E), MPa	liczba Poisson'a	R ₀₂ , MPa
PA9 (sabot)	2,85	71600	0,33	800 (dynamiczna)
Spiek wolframu (segmenty penetratora)	17,3	340000	0,3	2000 (dynamiczna)
Stal (tuleja łącząca)	7,8	210000	0,3	1200 (statyczna)
Poliamid (pierścień uszczelniający)	1,1	7100	0,42	86 (statyczna)

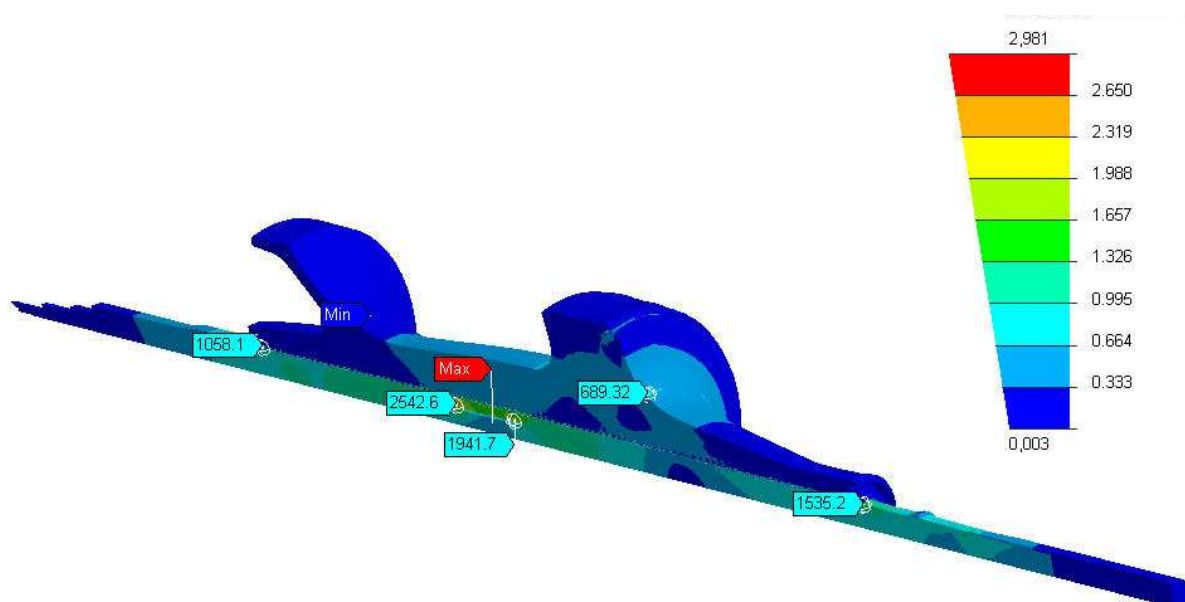
2.1. Wariant I

Na rysunku 7 przedstawiono model obliczeniowy pocisku w wariantcie I, a na rysunku 8 rozkład naprężeń zredukowanych w elementach tego pocisku podczas strzału.

Koncentracje naprężeń w penetratorze występują w środkowej części połączenia kształtowego z sabotem 2981MPa (minimalnej wielkości koncentracja na powierzchni jednego z ząbków tulei łączącej) oraz na końcach połączeń sabotu z rdzeniem, gdzie wyężenie w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosło odpowiednio 1058,1 MPa i 1535,2 MPa. W całym połączeniu kształtowym pomiędzy sabotem i penetratorem maksymalne wartości naprężeń zredukowanych nie przekraczają 2100 MPa. Z założenia konstrukcyjnego wartości naprężeń zredukowanych nie powinny przekraczać wartości dynamicznej granicy plastyczności materiału penetratora, czyli około 2000 MPa. Jednakże pomimo występowania w penetratorze w/w minimalnej koncentracji naprężeń zredukowanych, mogącej wpływać na niewielkie miejscowe uplastycznienie materiału, konstrukcja ta funkcjonowała prawidłowo w czasie przeprowadzonych w roku 2005 badań strzelaniem. Wobec powyższego rozpoczęto następny etap analizy wytrzymałościowej, mający na celu określenie możliwości zastosowania dłuższego (w przedniej części) penetratora w celu zwiększenia możliwości przebiccia.



Rys. 7. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS WITU w wariantcie I

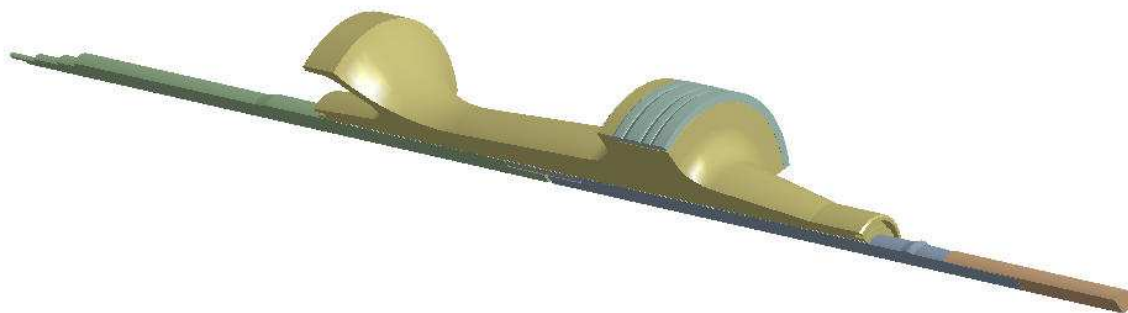


Rys. 8. Naprężenia zredukowane w wariantcie I pocisku podkalibrowego APFSDS o konstrukcji segmentowej

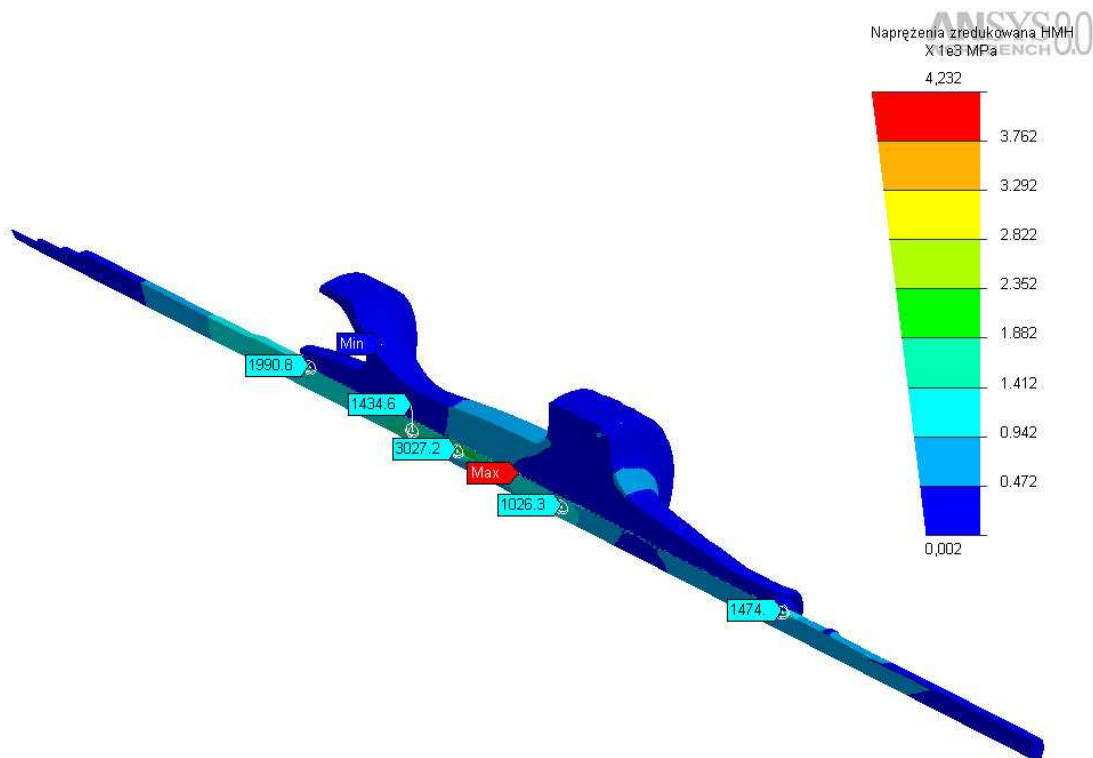
2.2. Wariant II

Na rysunku 9 przedstawiono model obliczeniowy pocisku w wariantcie II z penetratorem wydłużonym w przedniej części o około 60 mm, a na rysunku 10 rozkład naprężeń zredukowanych w elementach tego pocisku podczas strzału.

Koncentracje naprężeń w penetratorze występują w środkowej części połączenia kształtowego z sabotem 4232MPa oraz na końcach połączeń sabotu z rdzeniem, gdzie wyężenie w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosło odpowiednio 1990,8 MPa i 1474 MPa. W całym połączeniu kształtowym pomiędzy sabotem i penetratorem maksymalne wartości naprężeń zredukowanych nie przekraczają 2600 MPa. Wobec otrzymanego symulowanego stanu naprężeń wariant II wymaga modyfikacji konstrukcyjnej w celu obniżenia wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych do założonego poziomu bezpieczeństwa, czyli około 2000 MPa. W wariantcie III (rys.11) zmodyfikowano konstrukcję sabotu (wydłużając jego tylną część) w celu przesunięcia (o kilkadziesiąt mm w tył) penetratora w stosunku do sabotu. Umożliwi to zmniejszenie koncentracji naprężeń w przedniej części penetratora a także obniżenie wartości maksymalnej naprężeń na wysokości tulei łączącej poprzez jej usztywnienie pod tylną półką sabotu. Analizę tego wariantu przedstawiono w następnym podpunkcie.



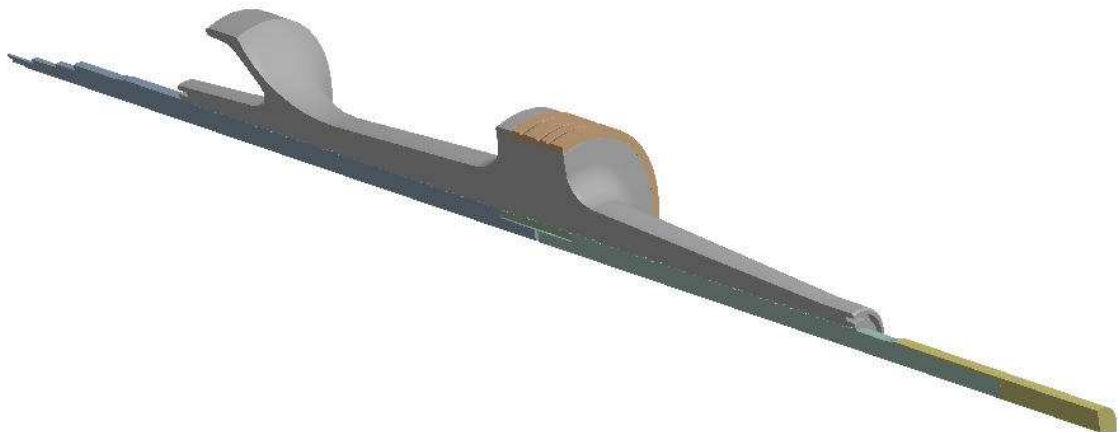
Rys. 9. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS WITU w wariantcie II z wydłużonym w przedniej części penetratorem



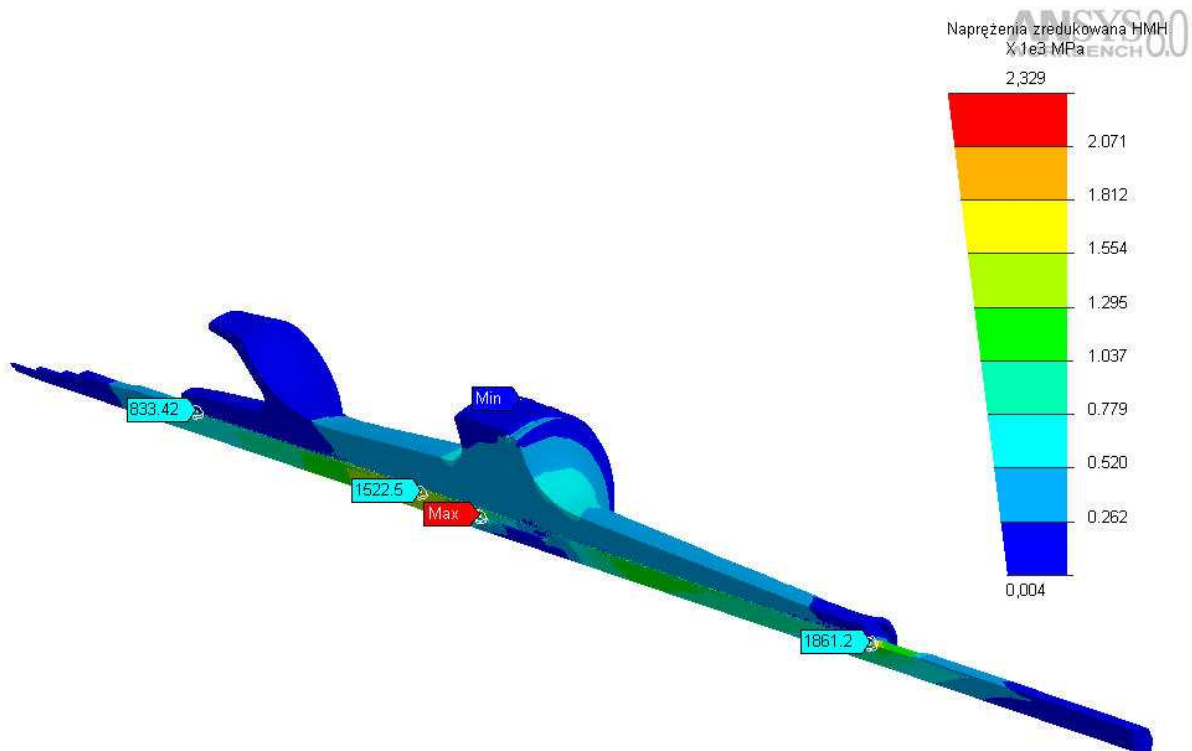
Rys. 10. Naprężenia zredukowane w wariantcie II pocisku podkalibrowego APFSDS o konstrukcji segmentowej

2.3. Wariant III

Na rysunku 12 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w elementach tego wariantu III pocisku podczas strzału. Koncentracje naprężeń w penetratorze występują w środkowej części połączenia kształtowego z sabotem 2329MPa oraz na końcach połączeń sabotu z rdzeniem, gdzie wyężenie w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosło odpowiednio 833,4 MPa i 1861,2 MPa. W całym połączeniu kształtowym pomiędzy sabotem i penetratorem maksymalne wartości naprężeń zredukowanych nie przekraczają 2000 MPa. Dzięki modyfikacji konstrukcji uzyskano znaczne zredukowanie wartości naprężeń H-M-H do założonego bezpiecznego poziomu. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia wytrzymałościowe pocisku w wariantcie III ze zmodyfikowanym zmiennym zazębieniem pomiędzy penetratorem i sabotem. Analizę tego wariantu przedstawiono w następnym podpunkcie.



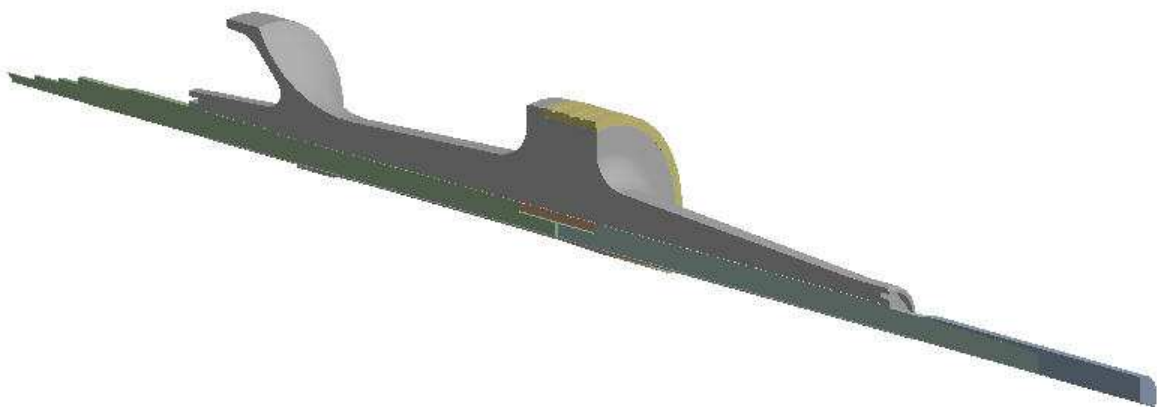
Rys. 11. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS WITU w wariantcie III z wydłużonym i przesuniętym w tył penetratorem



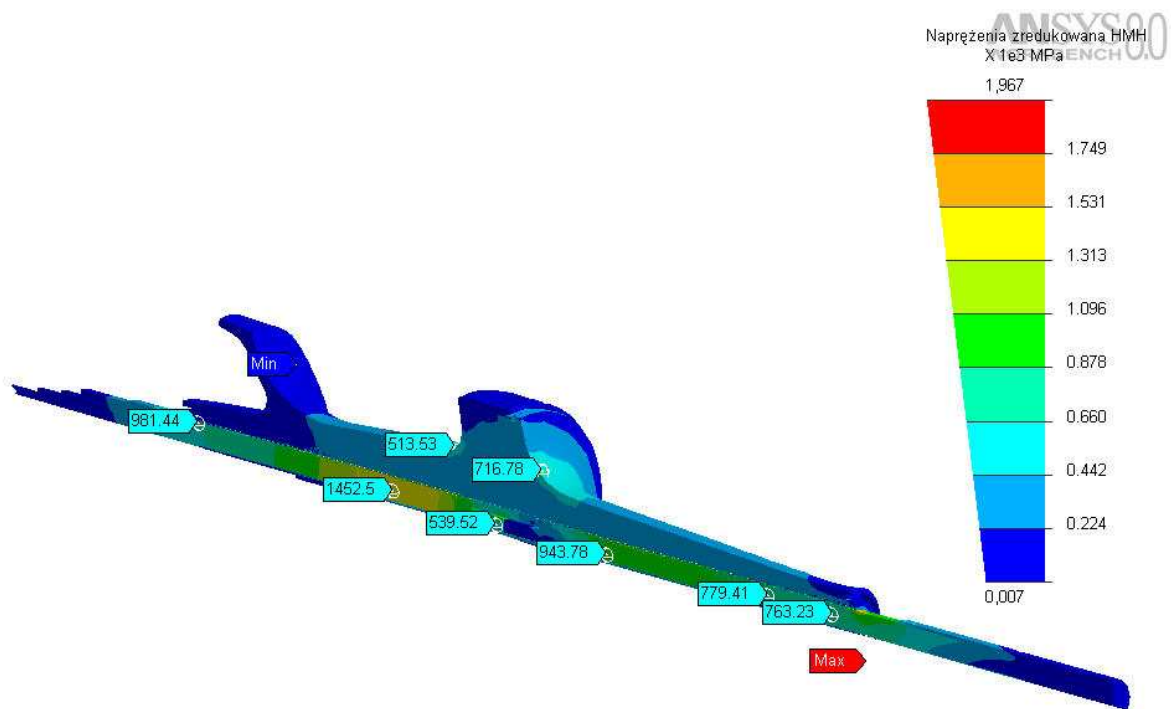
Rys. 12. Napężenia zredukowane w wariantcie III pocisku podkalibrowego APFSDS o konstrukcji segmentowej

2.3. Wariant IV

Na rysunku 13 przedstawiono model obliczeniowy pocisku w wariantcie IV ze zmiennym ząbieniem penetrator-sabot, a na rysunku 14 rozkład naprężeń zredukowanych w elementach tego pocisku podczas strzału. Koncentracja naprężeń w penetratorze występuje w jego tylnej części - 1967 MPa, a w całym połączeniu kształtowym pomiędzy sabotem i penetratorem maksymalne wartości naprężeń zredukowanych nie przekraczają 1800 MPa. Dzięki modyfikacji połączenia kształtowego penetrator-sabot uzyskano dalszą redukcję wartości naprężeń maksymalnych H-M-H poniżej założonego bezpiecznego poziomu 2000MPa. Wariant IV został przyjęty jako rozwojowy konstrukcji pocisku o zwiększonej zdolności przebicia pancerza kompozytowego.



Rys. 13. Model 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS WITU w wariantcie IV z wydłużonym, przesuniętym w tył penetratorem i zmiennym ząbieniem penetrator-sabot



Rys. 14. Naprężenia zredukowane w wariantcie IV pocisku podkalibrowego APFSDS o konstrukcji segmentowej

4. Podsumowanie

Analiza wyników numerycznych obliczeń wytrzymałościowych MES umożliwiła, na etapie projektowania pocisku z penetratorem segmentowym, dokonanie wyboru konstrukcji najlepiej spełniającej wymóg poprawnego funkcjonowania pocisku w czasie strzału. Poniżej (tabela 2) przedstawiono porównanie podstawowych parametrów taktyczno-technicznych użytkowanego w Wojsku Polskim 120 mm pocisku podkalibrowego DM-33A1, 120 mm pocisku podkalibrowego APFSDS-T konstrukcji WITU (wariant I) będącego obecnie w fazie badań i prac wdrożeniowych oraz wersji rozwojowej 120 mm pocisku podkalibrowego z penetratorem segmentowym (wybrany wariant IV).

Tabela 2

	120 mm DM-33A1	120 mm APFSDS-T (WITU)	120 mm APFSDS-T Wariant IV (WITU)
Masa pocisku (kg)	7,3	6,7	7,3
Masa pocisku na torze lotu (kg)	4,6	3,7	4,1
Średnica penetratora (mm)	28	24	24
Długość penetratora (mm)	570	520	580
Prędkość początkowa (m/s)	1650	C	1650
Maks. Ciśnienie na zamek (MPa)	515	430	515
Przebicie płyty RHA pod kątem 60° na odl. 2000m (mm)	230 (dane producenta)	250 (wynik badań strzel.)	280 (wg wzoru Helda)

Wzór Helda, określający przebicie pancerza w całym zakresie prędkości pocisku:

$$P = \eta L \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t}} \quad (2)$$

gdzie: P - głębokość przebicia pancerza, η - współczynnik efektywności zależny od prędkości uderzenia pocisku V_t i dynamicznej twardości materiału pancerza HB_t [7] (przyjęto 0,65), L - początkowa długość rdzenia (penetratora) pocisku, ρ_p - gęstość materiału rdzenia (penetratora), ρ_t - gęstość materiału pancerza.

Teoretyczne możliwości przebicia pancerza RHA pociskiem w wariantach IV są o około 12% większe od zdolności przebicia badanego obecnie 120 mm pocisku APFSDS-T. Jest to efekt zwiększenia jego energii kinetycznej w chwili uderzenia pocisku w pancerz dzięki wydłużeniu penetratora.

Następnym etapem podjętej pracy będzie budowa numerycznego modelu przebicia penetratorem segmentowym pancerza warstwowego w celu optymalizacji konstrukcji pocisku, a szczególnie określenia wpływu długości tulei łączącej (a co za tym idzie odległości pomiędzy wolframowymi segmentami) oraz kształtu wierzchołka pocisku na proces penetracji elementów pancerza warstwowego.

Literatura

- [1] Witkowski I.: Czołgi Świata, Wydawnictwo WIS s.c., Warszawa, 1993, s. 37÷40.
- [2] Advances in Ceramic Armor: A Collection of Papers Presented at the 29th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, January 23-28, 2005, Cocoa Beach, Florida, Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 26, Number 7.
- [3] Wiśniewski A.: Pancerze. Budowa, projektowanie i badanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [4] Magier M.: Metody oszacowania głębokości przebicia pancerza przez pociski kinetyczne, Biul. PTU WITU (w druku).
- [5] Kruszka L., Magier M., Włodarczyk E.: Doświadczalne badania lepkoplastycznych własności stopu aluminium PA9, materiały z V Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej NATU Waplewo, 6÷8.10.2004 r., s. 468÷474.
- [6] Kruszka L., Majewski T.: Modelowanie lepkoplastycznych właściwości spieków ciężkich W-Ni-Fe dla różnych szybkości odkształceń, materiały z VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej NATU Waplewo, 11÷13.10.2006 r., s. 579÷587.
- [7] Hohler, V., Stilp, A.J.: Aeroballistic and Impact Physics Research at EMI: An Historical Overview, International Journal of Impact Engineering, Vol.17 (1995), pp. 785÷805.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006-2008 jako projekt badawczy rozwojowy nr R 00 018 02.