

prof. dr hab. inż. Edward WŁODARCZYK *
kpt. mgr inż. Mariusz MAGIER **
* Wojskowa Akademia Techniczna
** Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

MODERNIZACJA KONSTRUKCJI POCISKU TYPU APFSDS-T Z ZASTOSOWANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

W artykule przedstawiono koncepcję modernizacji 125 mm pocisku typu APFSDS-T konstrukcji WITU z wykorzystaniem kompozytu na osnowie węglowej

1. Wstęp

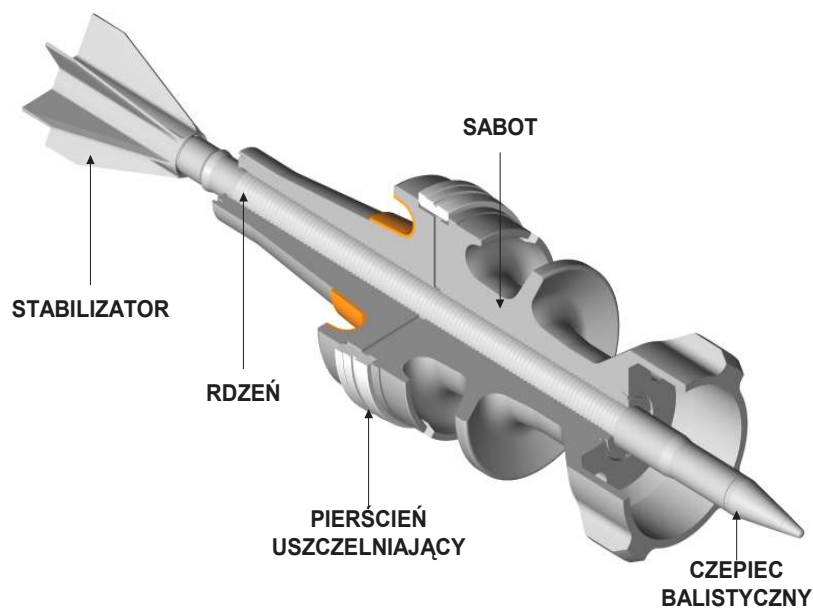
Na początku XXI wieku amunicja podkalibrowa jest podstawowym rodzajem amunicji przeciwpancernej stosowanej w uzbrojeniu czołgów.

Stało się tak za sprawą kilku zasadniczych zalet tego rodzaju amunicji, a mianowicie:

- znacznych zdolności przebicia (500÷700 mm – pancerz RHA) na dystansie 2000 m;
- dużej prędkości początkowej i jej małemu spadkowi na torze lotu (55÷150 m/s na 1000m), warunkujących krótki czas lotu pocisku do celu (1,5÷2 s na 2000 m);
- dużą celność (rozzut średnio 0,25 mrad);
- małej wrażliwości na oddziaływanie pancerza reaktywnego;
- szokowe oddziaływania na załogę czołgu, wywołane udarem penetratora w pancerz;
- duża średnica krateru.

Pocisk typu APFSDS-T, pokazany na rys.1, składa się z pocisku zasadniczego i części prowadząco-uszczelniającej zwanej sabotem, który po opuszczeniu przewodu lufy odpada wraz z pierścieniem uszczelniającym.

Częściami składowymi pocisku zasadniczego są: rdzeń (zwany także penetratorem), stabilizator i czepiec balistyczny.



Rys.1. Budowa 125 mm pocisku typu APFSDS-T

Wydłużone pociski podkalibrowe zalicza się do kinetycznych pocisków artyleryjskich (KE), które charakteryzują się wysoką energią kinetyczną odniesioną do jednostki pola powierzchni przekroju poprzecznego penetratora

Głębokość penetracji kinetycznych pocisków artyleryjskich w metaliczne przegrody pancerne zależy od następujących czynników: dynamicznych twardości i gęstości materiałów pocisku.

Dla uzyskania możliwie dużych wartości tych parametrów, rdzenie wykonuje się najczęściej z wysokowytrzymałych stopów ciężkich (spieki z osnową wolframową - $\rho \approx 17500 \text{ kg/m}^3$, uran zubożony - $\rho \approx 19000 \text{ kg/m}^3$). Przy małej średnicy rdzenia (rzędu 23-45 mm dla armat kalibru 120-125 mm) – a co za tym idzie, małej powierzchni pola przekroju poprzecznego i dużej smukłości ($l/d = 30$) oraz prędkości uderzenia osiągana jest na kontakcie z pancerzem wysoka gęstość energii, która decyduje o głębokości penetracji. Współczesne pociski podkalibrowe z odrzucanym sabotem, stabilizowane brzechwowo, odznaczają się małym spadkiem prędkości pocisku na torze lotu, a wynika to z geometrii budowy pocisku (dla najnowszych konstrukcji światowych wynosi on ok. 50 m/s na odległości 1000 m). Przy prędkościach początkowych rzędu 1500-1800 m/s daje to duże prędkości uderzenia w cel na odległościach nawet powyżej 2000 m

Podczas strzału niezbędna jest duża siła do nadania znacznej prędkości rdzeniowi po to, by ten osiągnął odpowiednio dużą energię kinetyczną. Do tego celu służy sabot, który posiada średnicę zewnętrzną w przybliżeniu odpowiadającą kalibrowi armaty. Przekazywanie siły gazów prochowych z sabotu na rdzeń odbywa się za pośrednictwem rozłącznego połączenia kształtowego (gwinty lub rowki). Segmenty sabotu są utrzymywane na penetratorze jako cały zespół dzięki dwóm pierścieniom. Na tylną półkę sabotu nałożony jest pierścień uszczelniający, którego zadaniem jest uszczelnienie i niedopuszczenie do przedostania się gazów prochowych z przestrzeni zapociskowej do objętości zawartej pomiędzy ścianką lufy a powierzchnią sabotu. Drugi z pierścieni - pierścień prowadzący - nałożony jest na przednią półkę sabotu. Pierścienie najczęściej wykonywane są z tworzyw sztucznych (np. z poliamidu). W zasadzie wszystkie elementy (poza oczywiście smugaczem) są niejako pomocniczymi w stosunku do wykonanego z materiału o dużej gęstości -

penetratora, których zadaniem jest nadanie mu dużej energii kinetycznej i doprowadzenie do celu.

Połączenie sabotu i penetratora jest uszczelniane, ponieważ przedmuchy gazów są bardzo niebezpieczne i gdy wystąpią, może dojść do zniszczenia pierścienia, sabotu lub rozcalenia połączenia, jeszcze w lufie. Na tylną powierzchnię sabotu nakładane są warstwy uszczelnień (głównie masy silikonowe), stosuje się dodatkowe elementy z plastycznych tworzyw. Sumaryczna masa napędzanego w lufie układu pocisk zasadniczy - sabot powinna być znacznie mniejsza od masy pełnokalibrowego pocisku typowego dla danego działa, co umożliwi zwiększenie prędkości początkowej pocisku zasadniczego bez obawy uszkodzenia lufy i zespołu oporopowrotnika. Powoduje to znaczne zwiększenie przyspieszenia pocisku w przewodzie lufy i istotny wzrost sił bezwładności działających na rdzeń pocisku. Ponadto, skokowe zmniejszenie średnicy pocisku po wylocie z lufy (odrzućcie sabotu) poważnie obniża wartość aerodynamicznego oporu czołowego i dlatego pocisk zasadniczy w mniejszym stopniu wytraca prędkość na torze lotu, powodując w końcowym efekcie wzrost prędkości uderzenia pocisku zasadniczego w cel. Te cenne zalety, w połączeniu z dużą penetracją rdzenia w pancerz RHA, spowodowały wprowadzenie odpowiednich konstrukcji pocisków podkalibrowych do armat różnego rodzaju czołgów (*T-72*, *PT-91 Twardy*, *Leopard 2*, *M1A1 Abrams* i inne).

Jak widać z przedstawionego wyżej skróconego opisu wydłużonego pocisku podkalibrowego, jego rdzeń i sabot poddane są ekstremalnym obciążeniom od ciśnienia produktów spalania prochu artyleryjskiego i sił bezwładności, generowanych przez duże przyspieszenia (rzędu 60 000 ÷ 80 000g) pocisku w lufie podczas strzału. Zatem problem obliczeń wytrzymałościowych rdzenia i sabotu pocisku podkalibrowego nabiera specjalnego znaczenia.

2. Analiza wytrzymałościowa MES 125 mm pocisku typu APFSDS-T

Analizę konstrukcji 125 mm pocisku typu APFSDS-T, skonstruowanego w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, przeprowadzono tak, aby na podstawie wyników obliczeń wytrzymałościowych Metodą Elementów Skończonych, określić możliwości optymalizacji konstrukcji sabotu, w celu zwiększenia prędkości początkowej pocisku, a co za tym idzie zwiększenia zdolności przebicia pancerza przez pocisk.

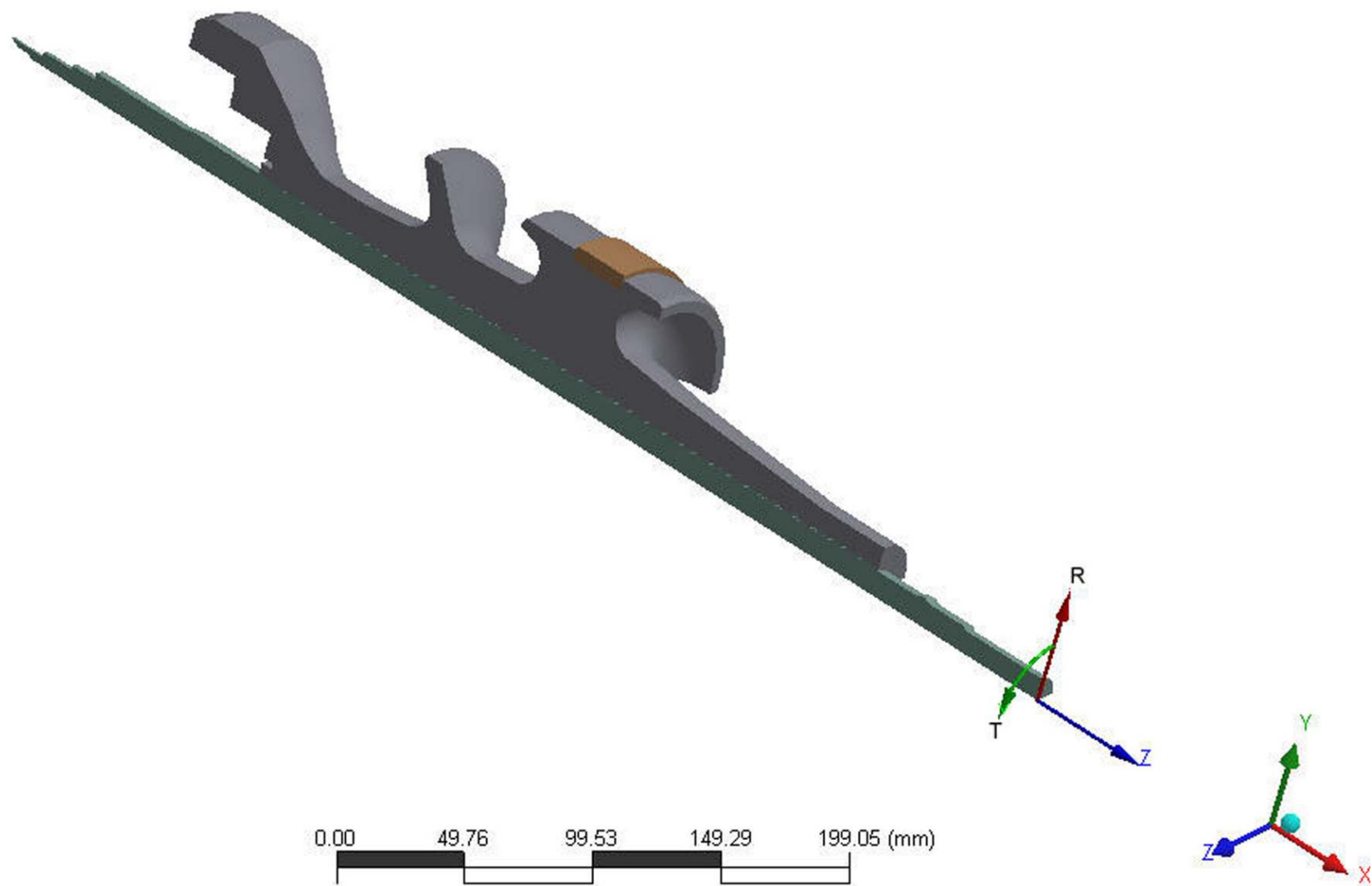
Obliczenia numeryczne wykonano przy pomocy programu ANSYS 8.0 PL - moduł Design Space i przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

- zadanie wytrzymałościowe będzie rozpatrywane przy założeniu liniowych charakterystyk materiałowych i izotropowości materiału sabotu, rdzenia 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 90°,
- 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,

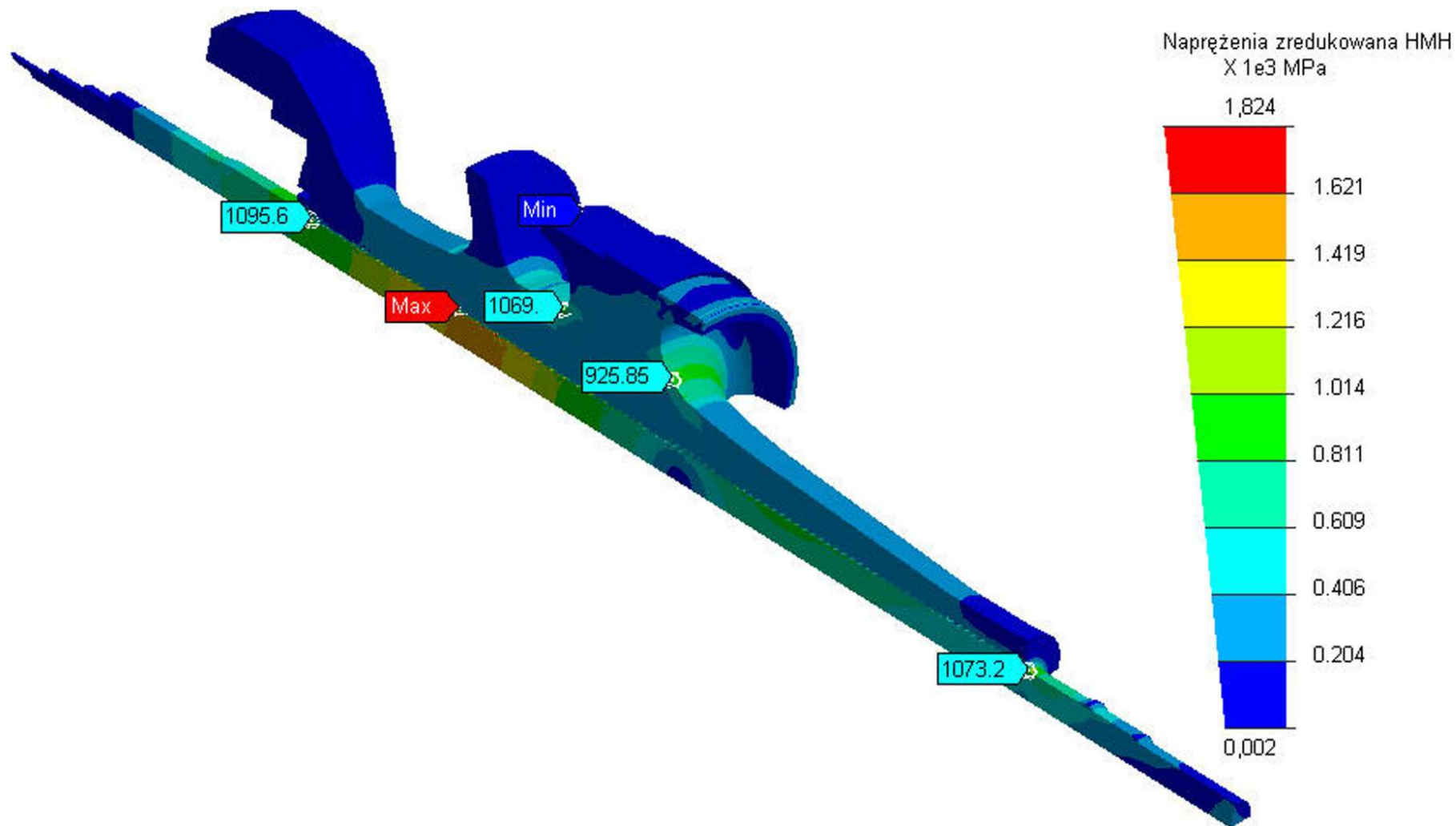
- połączenie kształtowe sabotu i rdzenia ma charakter trwałego pełnego połączenia,
- tylną powierzchnię pocisku obciążono ciśnieniem gazów prochowych o wartości 357,7 MPa, odpowiadającej maksymalnemu ciśnieniu działającemu na pocisk w czasie strzału przy temperaturze ładunku miotającego 295 K (wyniki obliczeń uzyskane za pomocą programu do rozwiązania PGBW – PZB2),
- wszystkie elementy pocisku obciążono przyspieszeniem globalnym o wartości 568310m/s^2 , 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.

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} (dynamiczna), MPa
PA9	2,85	71600	0,33	~800
Spiek wolframu	17,3	340000	0,3	~1800
Poliamid	1,1	7100	0,42	86 (statyczna)



Rys. 2. Widok geometrii modelu z układami współrzędnych: globalnym (X, Y, Z) i lokalnym walcowym (Z,R,T)



Rys. 3. Wytężenie wg hipotezy H-M-H dla pocisku z sabotem ze stopu PA9

Wytrzymałość materiału sabotu (PA9) wg hipotezy H-M-H osiągnęła największe wartości w dwóch miejscach sabotu:

1. wartość 925,85 MPa w łuku przejścia tylnej części sabotu w tylną półkę. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z , przyjmuje wartość dodatnią (rozciąganie) 488,68 MPa, składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość 345,67 MPa, składowa obwodowa naprężenia σ_ϕ osiąga wartość 114,66 MPa, zaś składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -540,4 MPa.
2. wartość 1069 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z , przyjmuje wartość ujemną (ściskanie) -1077,3 MPa, składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość -495,4 MPa, składowa obwodowa naprężenia σ_ϕ osiąga wartość -424,06 MPa, zaś składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -428,29 MPa.

Jednocześnie zauważyć można, że przednia część sabotu jest słabo wytrzymała, co daje przesłanki do „odchudzenia” sabotu w tym rejonie.

Wartości przemieszczeń w materiale sabotu nie przekraczają 0,72 mm w kierunku osiowym i 0,074 mm w kierunku promieniowym.

Koncentracje naprężeń w rdzeniu występują w środkowej części połączenia kształtowego z sabotem 1824 MPa oraz na końcach połączeń sabotu z rdzeniem gdzie wytrzymałość w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosła odpowiednio 1095,6 MPa i 925,85 MPa.

Pomimo występowania w sabocie niewielkich stref uplastycznienia materiału konstrukcja sabotu zapewniła prawidłowe funkcjonowanie pocisku w lufie i na torze lotu, co potwierdziły pozytywne wyniki badań kwalifikacyjnych partii prototypowej. W rzeczywistej konstrukcji 125 mm pocisku typu APFSDS-T (WITU) masa sabotu wykonanego ze stopu PA9 wynosi 3,85 kg, przy masie całego pocisku 7,55 kg.

3. Analiza wytrzymałościowa pocisku WITU z sabotem kompozytowym

W celu modernizacji konstrukcji sabotu należy przede wszystkim dokonać próby zastosowania lżejszego materiału konstrukcyjnego, np. kompozytu węglowego na podstawie węglowej.

Kompozyty składające się z osnowy i wzmocnienia wykonanych z węgla należą do najbardziej zaawansowanych materiałów konstrukcyjnych. Koszty zastosowania tego typu materiału w konstrukcji są jeszcze wysokie, dlatego nie występują one jeszcze w powszechnym użyciu. Najważniejsze cechy tego materiału to: wysoki moduł sprężystości i wytrzymałość na rozciąganie, które utrzymują się nawet w temperaturach przekraczających 2000 °C, odporność na pęcznienie oraz względnie wysoka wytrzymałość na kruche pękanie. Gęstość tych kompozytów wynosi do 2 g/cm³ i jest zbliżona do gęstości kompozytów polimerowych. Ponadto kompozyty węgiel-węgiel mają niski współczynnik rozszerzalności termicznej oraz względnie wysoką przewodność cieplną. Połączenie tych cech przyczynia się do niskiej wrażliwości tych kompozytów na szok termiczny. Podstawową wadą kompozytów węgiel-węgiel jest skłonność do gwałtownego utleniania w wysokich temperaturach. Proces ten przebiega przede wszystkim na granicy włókien z osnową, która jest odpowiedzialna w istotny sposób za właściwości mechaniczne kompozytu, i dlatego materiał bardzo szybko traci swoją wytrzymałość.

W czołgowej amunicji podkalibrowej zastosowano po raz pierwszy kompozyt grafitowy na osnowie epoksydowej w sabocie amerykańskiego 120 mm pocisku typu APFSDS-T M829A2 (w wersji A1 zastosowano stop aluminium). Projekt ten opisano w pracy [1] Dzięki takiemu rozwiązaniu zredukowano masę sabotu około 30% w stosunku do poprzedniej wersji (A1), co wpłynęło na zwiększenie: prędkości początkowej pocisku i głębokości przebicia pancerza.

W poniższej tabeli zestawiono wybrane charakterystyki stopu PA9 i kompozytu C-C.

Tabela 2

Typ materiału	Gęstość (g/cm ³)	Granica plastyczności R ₀₂ (MPa)	Moduł Young'e'a E (GPa)
PA9	2,85	590	71,6
Kompozyt C-C	1,9	850	240

Z porównania przedstawionego w tabeli 5.2 wynika, że kompozyt C-C zastosowany w konstrukcji sabotu, nie tylko wpłynie na zmniejszenie jego masy, ale dodatkowo zwiększy jego wytrzymałość.

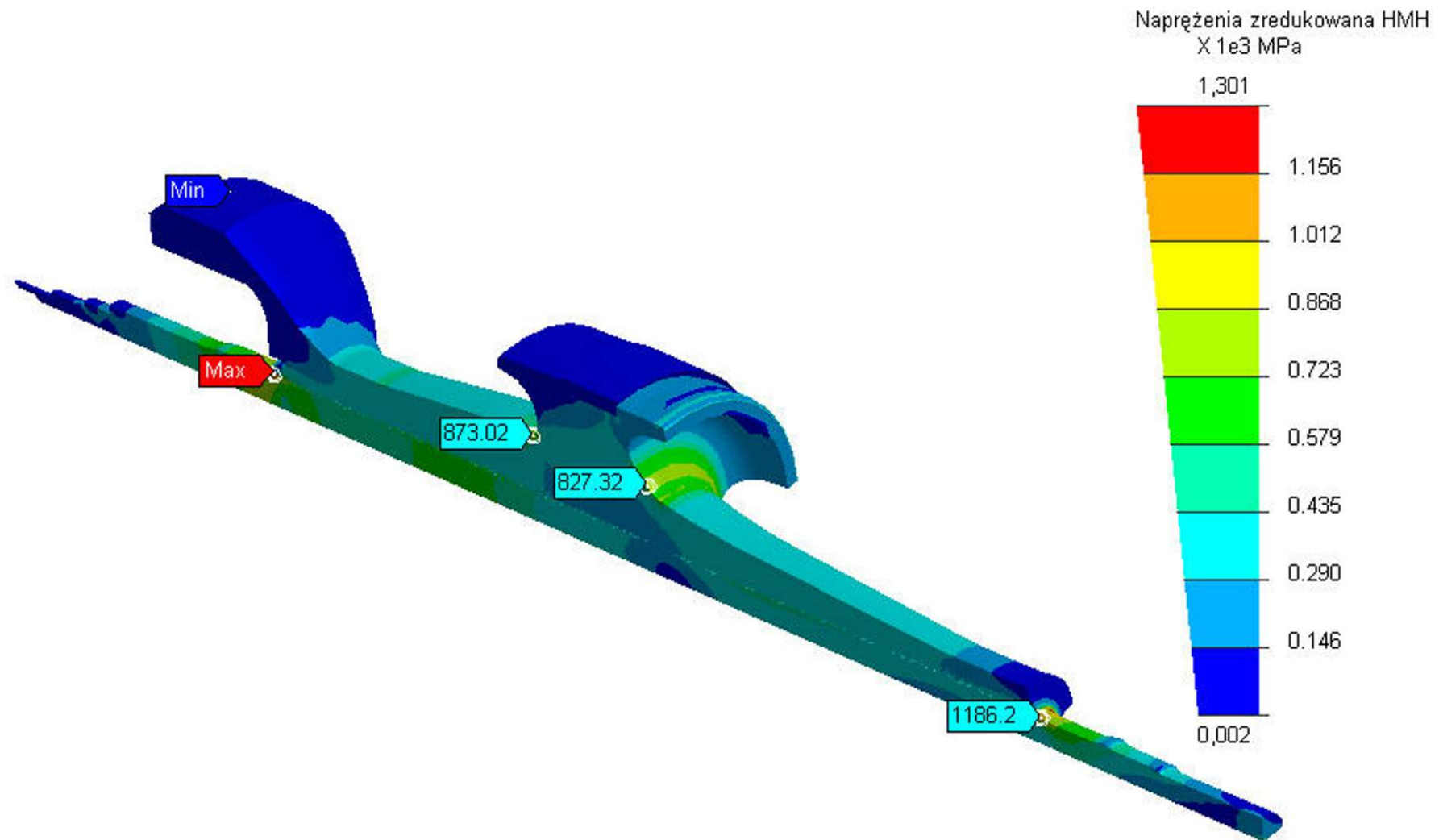
Należy jednak zwrócić uwagę, że przedstawione materiały charakteryzują się różnymi wartościami odkształceń niszczących. Dla stopu PA9 wartość A₅ po badaniu próbki na statyczne rozciąganie wynosi 9,2÷11% zaś odkształcenia niszczące dla włókien węglowych wahają się w granicach 0,45÷2,4%. Fakt ten należy uwzględnić przy projektowaniu wytrzymałościowym zmodernizowanego sabotu z wykorzystaniem kompozytu C-C.

Numeryczne obliczenia wytrzymałościowe zmodernizowanej wersji sabotu kompozytowego C-C przeprowadzono w oparciu o założenia przyjęte w pkt. 2. Kształt sabotu zmodernizowano usuwając środkową półkę oraz „odchudzając” jego przednią część.

Pocisk obciążono w sposób następujący:

- tylną powierzchnię pocisku, obciążono ciśnieniem gazów prochowych o wartości 305MPa,
- wszystkie elementy pocisku obciążono przyspieszeniem globalnym o wartości 652094m/s², równoważącym oddziaływanie ciśnienia gazów prochowych na pocisk.

Oczywiście przeprowadzona analiza jest pierwszym przybliżeniem, zakładającym, że kompozyt C-C jest materiałem izotropowym. W celu dokładniejszej analizy wytrzymałościowej należałoby zastosować program obliczeniowy, uwzględniający anizotropowość i wielowarstwowość kompozytu C-C.



Rys. 4. Wytyżenie wg hipotezy H-M-H dla pocisku z sabotem z kompozytu na osnowie węglowej

Wyężenie materiału sabotu (kompozyt C-C) wg hipotezy H-M-H osiągnęło największe wartości w dwóch miejscach sabotu:

1. wartość 827,32 MPa w łuku przejścia tylnej części sabotu w tylną półkę. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z , przyjmuje wartość dodatnią (rozciąganie) 434,8MPa, składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość 351,1 MPa, składowa obwodowa naprężenia σ_ϕ osiąga wartość 102,2 MPa, zaś składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -473,07 MPa.
2. wartość 873 MPa po drugiej stronie tylnej półki. W tym miejscu składowa osiowa naprężenia σ_z , przyjmuje wartość ujemną (ściskanie) -958 MPa, składowa promieniowa naprężenia σ_r osiąga wartość -351 MPa, składowa obwodowa naprężenia σ_ϕ osiąga wartość -358,6 MPa, zaś składowa naprężenia tnących τ_{rz} osiąga wartość -412,41 MPa.

Wartości przemieszczeń w materiale sabotu wskazują, że ich maksymalne wartości w nie przekraczają 0,26 mm w kierunku osiowym i 0,024 mm w kierunku promieniowym.

Dzięki sztywniejszym charakterystykom wytrzymałościowym kompozytu węglowego ($E=240\text{GPa}$), w porównaniu do stopu PA9 ($E=71\text{GPa}$), nie wystąpiły koncentracje naprężenia zredukowanych w rdzeniu w środkowej części połączenia kształtowego z sabotem.

Wyężenie w przednim i tylnym przekroju niebezpiecznym rdzenia wyniosło odpowiednio 1301MPa i 1186,2 MPa.

Ponieważ maksymalna wartość naprężenia zredukowanych w obliczeniach numerycznych generalnie nie przekracza dynamicznych granic plastyczności materiałów rdzenia, a w przypadku sabotu oscyluje w granicach jej wartości, zmodernizowany kształt sabotu wykonanego z kompozytu na podstawie węglowej powinien zapewnić prawidłowe funkcjonowanie pocisku w lufie i na torze lotu.

W nowej konstrukcji 125 mm pocisku typu APFSDS-T (WITU) masa sabotu zmodernizowanego (wykonanego ze kompozytu) wyniosłaby 1,85 kg, przy masie całego pocisku 5,55 kg.

4. Wnioski

Z analizy MES wynika, że przy ustalonych parametrach rdzenia (długość, średnica) oraz ładunku miotającego (masa i rodzaje prochów), w celu zwiększenia prędkości początkowej rdzenia pocisku należy konstruować sabot tak, aby był możliwie lekki i wytrzymały, zdolny do przeniesienia dynamicznych obciążeń występujących w lufie podczas strzału. W tym względzie konkurencyjnymi materiałami w porównaniu z metalami są odpowiednie kompozyty węglowe. Tego typu modernizacja w 125 mm pocisku APFSDS (WITU) pozwoliłaby na zwiększenie prędkości początkowej o ponad 100 m/s, a co za tym idzie zwiększyłaby się zdolność przebicia pancerza z 500mm do ponad 600mm RHA.

Poniżej przedstawiono porównanie obecnej konstrukcji 125 mm pocisku typu APFSDS-T (WITU) z opcją jego modernizacji, na przykładzie wybranych charakterystyk balistyczno-bojowych.

Tabela 3

	125 mm APFSDS-T (WITU)	Modernizacja z sabotem kompozytowym
Masa pocisku (kg)	7,55	5,55
Masa sabotu (kg)	3,85	1,85
Masa rdzenia (kg)	3,7	3,7
Prędkość początkowa (m/s)	1650*	1764**
Max. Ciśnienie na zamek (MPa)	532,8**	408**
Max. Ciśnienie na pocisk (MPa)	357,7**	305**
Przebicie płyty RHA na odl. 2000m (mm)	500*	~610

*) dane uzyskane podczas badań kwalifikacyjnych partii prototypowej.

**) dane uzyskane za pomocą programu PGBW - PZB2.

Literatura:

1. Burns B. P., Drysdale W. H., Hoppel Ch. P., Bogetti T. A.: The development of composite sabots for kinetic energy projectiles, materiały z konferencji "19th International Symposium of Ballistics, 7-11 May 2001" Interlaken, Szwajcaria, s. 347÷353.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji w latach 2004-2005 jako projekt badawczy nr 0 T00B 028 26.