

WSTĘPNA IDENTYFIKACJA WPŁYWU NAPRĘŻEŃ ZGINAJĄCYCH W PENETRATORZE WYDŁUŻONEGO POCISKU PODKALIBROWEGO NA FUNKCJONOWANIE POCISKU NA TORZE LOTU

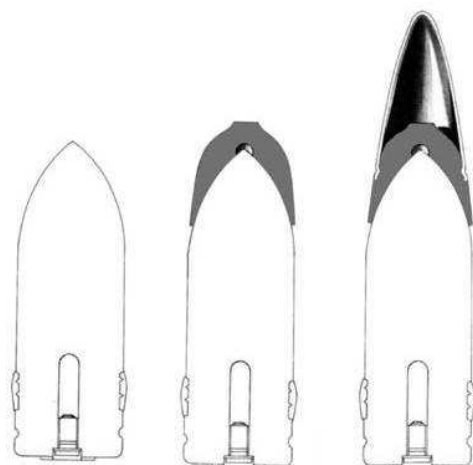
Streszczenie. W pracy przedstawiono wstępną charakterystykę konstrukcji wydłużonych pocisków podkalibrowych. Określono wpływ podstawowych parametrów penetratora pocisku podkalibrowego (długości l oraz średnicy d) na stan naprężeń zginających w pocisku na torze lotu.

INITIAL IDENTIFICATION OF THE BENDING STRESS IN SUBCALIBRE PROJECTILES PENETRATOR AND ITS INFLUENCE ON FLYING PROCESS

Abstract. In this paper the problem of the bending stresses of the penetrator during flying are presented. Conclusions about the influence of the penetrator's length (l) and diameter (d) to bending stress were formulated basing on the review of the literature and appropriate equations.

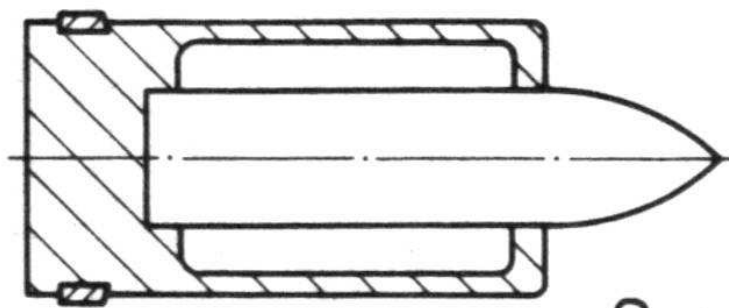
1. Wprowadzenie

Czołgi stworzyły nowy rodzaj sił zbrojnych- wojska pancerne, które zadebiutowały na polu walki podczas I Wojny Światowej. Początkowo służyły one przede wszystkim wsparciu pododdziałów piechoty na polu walki. Jednak już ówczesnie przewidywano potrzebę opracowania amunicji przeciwpancernej zdolnej do niszczenia wozów bojowych przeciwnika. W wydanej w 1917 roku książce Carla Cranza pt. „Lehrbuch der Ballistik” autor nie tylko oszacował energię pocisku niezbędną do wyeliminowania z walki człowieka i konia, ale także przedstawił pomysł wyposażenia pocisku ppanc. typu AP (*ang. armour piercing*) w czepiec balistyczny, co znalazło powszechne zastosowanie w późniejszych konstrukcjach pełno kalibrowych pocisków ppanc [1].



Rys.1.1. Kolejne generacje pełnokalibrowych przeciwpancernych pocisków kinetycznych typu AP (ang. *armour piercing*)

W czasie II Wojny Światowej wobec powszechnego użycia opancerzonych wozów bojowych zagadnienia związane z oddziaływaniem pocisku na pancerz nabrały szczególnego znaczenia wpływając na rozwój balistyki końcowej ppanc. pocisków kinetycznych. Wówczas narodziła się idea konstrukcji pocisku, który w momencie uderzenia w pancerz skupiałby swoją energią kinetyczną na jak najmniejszej powierzchni uzyskując większą głębokość przebicia niż pocisk o tej samej masie, ale większej średnicy. Prekursorami w tej problematyce byli Niemcy, którzy opracowali pocisk typu APHC (*ang. armour piercing hard core, niem. Panzerkerngeschoss*), składający się z kadłuba wykonanego ze stopu lekkiego i umieszczonego w jego wnętrzu rdzenia wykonanego z materiału o wysokich własnościach mechanicznych.

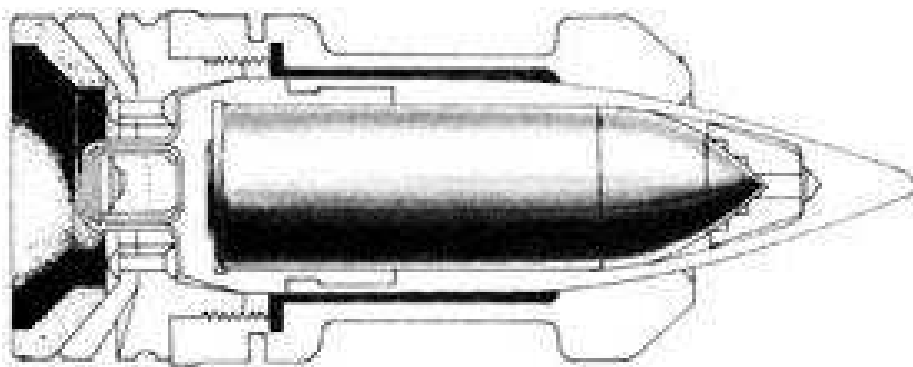


Rys.1.2. Przeciwpancerny pocisk kinetyczny typu APHC

Początkowo w konstrukcjach tych pocisków stosowano rdzenie wykonane ze stali oraz kadłuby pocisku wykonane ze stopu aluminium. Później stal zastąpiono materiałem o wyższej gęstości i twardości jak np. węgiel wolframu. Pociski APHC charakteryzowały się niższą energią wylotową w porównaniu do ppanc. pocisków pełno kalibrowych wystrzelianych z tych samych armat, jednakże ta niedogodność kompensowana była większą prędkością początkową pocisku APHC oraz znacznie krótszym czasem lotu pocisku do celu, zwiększającym prawdopodobieństwo trafienia ruchomego celu.

Kolejnym „milowym” krokiem w rozwoju konstrukcji amunicji ppanc. było opracowanie stabilizowanych obrotowo pocisków podkalibrowych z odrzucanym sabotem APDS (*ang. armour piercing discarding sabot*). Dzięki zastąpieniu kadłuba pocisku dzielonym na segmenty sabotem odrzucanym po wylocie z lufy, zredukowano średnice

pocisku zasadniczego (rdzenia) osiągając niższy spadek prędkości na torze lotu. W efekcie końcowym uzyskiwano większą prędkość i energię uderzenia rdzenia w pancerz. Dodatkowo zwiększono masę penetratorów (rdzeni) pocisków APDS stosując w miejsce węgliku wolframu ($\rho=15 \text{ g/cm}^3$) spieki na osnowie wolframowej ($\rho=17 \text{ g/cm}^3$) oraz zubożony uran ($\rho=19 \text{ g/cm}^3$).



Rys.1.3. Przeciwpancerny pocisk kinetyczny typu APDS

Głębokość penetracji stali pancernej pociskami APDS (o prędkościach początkowych około 1200 m/s) nie przekraczała 3 kalibrów, a wobec wprowadzenia do uzbrojenia w latach 50-tych ubiegłego wieku pocisków kumulacyjnych HEAT (*ang. high explosive anti tank*) o zdolności penetracji około 4 kalibrów, okazała się niekonkurencyjną. Dla przykładu ówczasie we Francji zrezygnowano z wprowadzenia do wyposażenia czołgów AMX-30 amunicji typu APDS zastępując ją amunicją typu HEAT. Ponieważ metodę stabilizacji obrotowej można zastosować do pocisków o stosunku długości l do średnicy d nieprzekraczającym 5, stwierdzono brak dalszych możliwości zwiększenia głębokości penetracji pociskami APDS.

Przełomu w konstrukcjach ppanc. pocisków kinetycznych dokonali Sowieci na początku lat 60-tych, wprowadzając do uzbrojenia nowy czołg T-62 uzbrojony w 115 mm armatę 2A20 o wewnętrznym gładkim przewodzie lufy. Jego następcą stał się czołg T-72 wyposażony w 125 mm armatę gładko lufową 2A46.



Rys.1.4. Sowiecki czołg T-62 uzbrojony w gładko lufową 115 mm armatę 2A20.

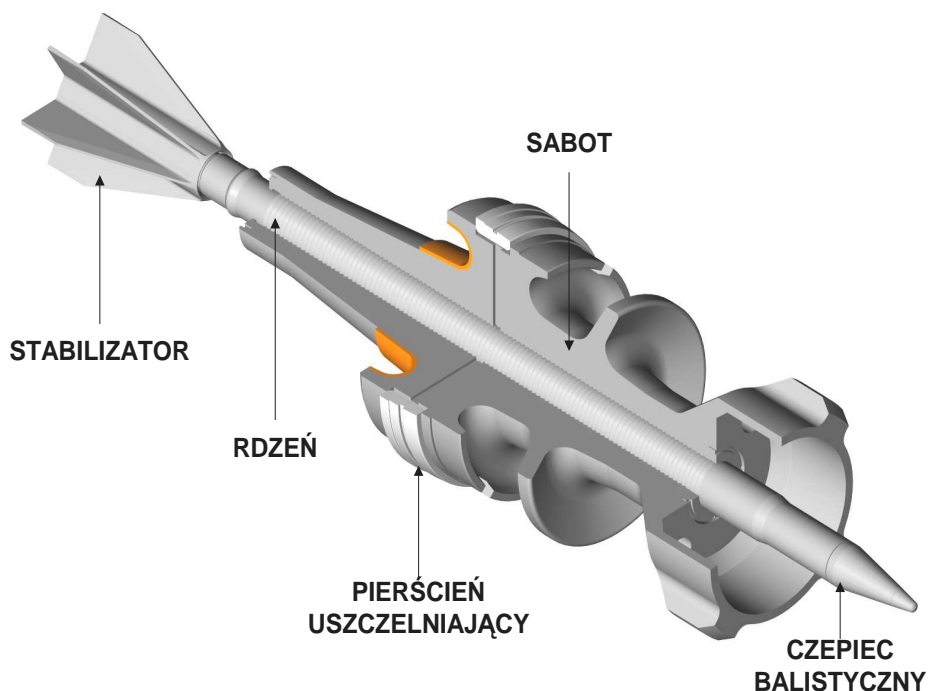
Wraz z zastosowaniem armaty gładko lufowej opracowano nową ppanc. amunicję podkalibrową stabilizowaną brzechwowo typu APFSDS (*ang. armour piercing fin stabilized discarding sabot*) o stosunku długości stalowego penetratora l do średnicy d od 10 (115 mm pocisk BM-6) do 15 (125 mm pocisk BM-15). Pociski te posiadały penetrator prowadzony napędzany w lufie poprzez pierścieniowy trójdzielny sabot stanowiący jednocześnie przedni element prowadzący pocisk w lufie. Drugim elementem prowadzącym były skrzydełka stabilizatora pocisku (rys.1.5).



Rys.1.5. 125 mm przeciwpancerny rosyjski pocisk BM-15 typu APFSDS z sabotem typu pierścieniowego.

W przypadku zachodnich konstrukcji pocisków APFSDS posłużono się sabotem typu siodłowego, charakteryzującym się dwiema półkami prowadzącymi pocisk w lufie (rys. 1.6)

Współczesny pocisk podkalibrowy 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.1.6. Budowa pocisku typu APFSDS z sabotem typu siodłowego.

Opracowanie nowej amunicji APFSDS do armat gładkolufowych stało się przełomem w problematyce zwiększania głębokości przebicia pancerzy czołgów. Możliwości osiągnięcia w armatach gładkolufowych prędkości początkowej pocisków APFSDS 1800 m/s oraz zwiększenia stosunku l/d znacznie powyżej wartości 10 wpłynęły na znaczne zwiększenie zdolności przebicia pancerzy (w porównaniu do pocisków APDS). Początkowo jako materiał penetratora stosowano stal o wysokich własnościach mechanicznych. Następnie opracowano pociski APFSDS z penetratorami stalowymi z rdzeniem węglkowo-wolframowym. W miarę rozwoju technologii spiekania (stosowanie dodatków: nikiel, żelazo, kobalt, miedź magnez) i obróbki mechanicznej spieków na osnowie wolframowej (m.in. kucie obwiedniowe) stosunek

długości penetratora do jego średnicy rósł od 10 do ponad 30. W tabeli nr 1.1 przedstawiono zestawienie podstawowych własności mechanicznych spieków wolframu od lat 70-tych.

Tabela 1.1 Podstawowe własności mechaniczne spieków wolframu

Rok wdrożenia spieku	1970	1978	1985	1995
Wytrzymałość na rozciąganie R_m (MPa)	800	1200	1450	1700
Granica plastyczności R_e (MPa)	≈650	1000	1400	1650
Wydłużenie A_5 (%)	1÷4	≈6	≈8	≈8

Od kilkunastu lat poszukuje się nowych możliwości zwiększania głębokości przebiecia pocisków kinetycznych.

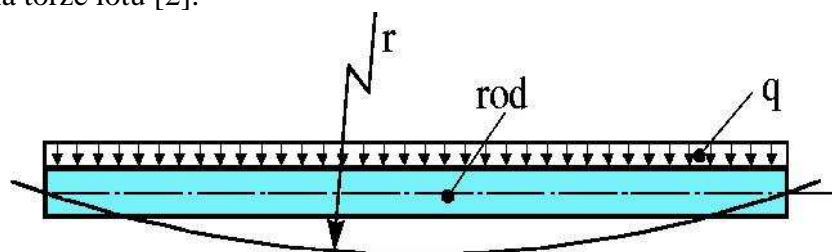
Dalsza modernizacja pocisków podkalibrowych do armat czołgowych (w celu zwiększenia głębokości przebiecia) za pomocą zwiększenia masy i długości penetratora jest obecnie ograniczona przez:

- parametry istniejących ładunków miotających (pracujących obecnie na pograniczu dopuszczalnych dla armat czołgowych ciśnień gazów prochowych),
- dopuszczalną przez urządzenia oporopowrotne armaty czołgowej wartość siły odrzutu, związaną z wylotową energią kinetyczną pocisku podkalibrowego,
- skrajnie dopuszczalne wymiary (długość) naboju składowanych w magazynach czołgu.

2. Wstępna identyfikacja naprężeń zginających penetratora wydłużonego pocisku podkalibrowego na torze lotu

Współczesne wydłużone penetratory kinetycznych pocisków podkalibrowych ulegają silnym obciążeniom gnącym podczas ruchu pocisku w lufie, na torze lotu a także podczas procesu penetracji pancerza.

Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat obciążenia zginającego wydłużonego pręta swobodnego na torze lotu [2].



Rys.2.1. Obciążenia zginające pręta cylindrycznego swobodnego (np. na torze lotu). r- promień zginający, q- obciążenie ciągłe.

Równania opisujące powyższy stan obciążenia [3] zawierają:

- moment zginający:

$$M = \frac{q \times l^2}{8} \quad (1)$$

- moment bezwładności przekroju:

$$I = \frac{\pi \times d^2}{64} \quad (2)$$

- wskaźnik wytrzymałości na zginanie:

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \quad (3)$$

gdzie:

l - długość pręta, q - obciążenie ciągłe.

Dla penetratora ulegającego przyspieszeniu poprzecznemu (zginającemu) a_q można przyjąć, że siła zginająca jest równoważna sile ciężkości. Stąd siłę zginającą można zdefiniować jako:

$$F_q = \frac{\pi d^2}{4} \times l \times \rho \times a_q \quad (4)$$

Przyspieszenie poprzeczne a_q definiujemy jako iloczyn współczynnika n oraz przyspieszenia ziemskiego g i jest wyznaczane doświadczalnie w czasie badań strzelaniem modeli penetratorów o identycznym stosunku l/d (przede wszystkim metodą optyczną – zdjęcia z kamery „szybkiej” lub rentgenowskiej):

$$a_q = n \times g \quad (5)$$

Obciążenie ciągłe q definiujemy jako:

$$q = \frac{F}{l} = \frac{\pi d^2}{4} \times \rho \times a_q \quad (6)$$

Na podstawie powyższych zależności można zdefiniować:

- naprężenia zginające

$$\delta_g = \frac{ql^2}{8W} = \rho a_q \frac{l^2}{d} \quad (7)$$

- maksymalne ugięcie

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} = \frac{5}{24} \frac{\rho a_q}{E} \left(\frac{l}{d} \right)^2 \quad (8)$$

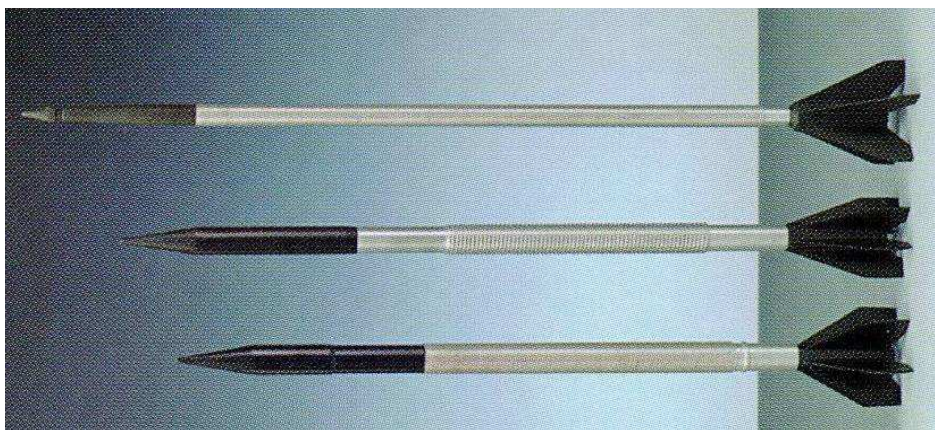
- krzywiznę pręta

$$k = \frac{M}{El} = 2 \frac{\rho a_q}{E} \left(\frac{l}{d} \right)^2 \quad (9)$$

Z zależności 7, 8, 9 wynika, że po przyjęciu niezmiennej wartości przyspieszenia a_q , zasadniczymi parametrami wpływającymi na stan naprężeń zginających i wielkość ugięcia są długość penetratora l oraz jego średnica d :

1. naprężenia zginające są wprost proporcjonalne do kwadratu długości penetratora l i odwrotnie proporcjonalne do jego średnicy d ,
2. maksymalne ugięcie jest wprost proporcjonalne do czwartej potęgi długości penetratora l i odwrotnie proporcjonalne do kwadratu jego średnicy d [4].

Ciągłe dążenie do osiągnięcia większych głębokości przebiccia skutkuje sytuacją, w której najnowsze konstrukcje 120 mm pocisków typu APFSDS posiadają penetratory o długości ponad 700 mm i średnicy 23 mm.



Rys.2.2. Kolejne generacje penetratorów pocisków APFSDS - od góry DM33, DM43, DM53 (fot. Rheinmetall).

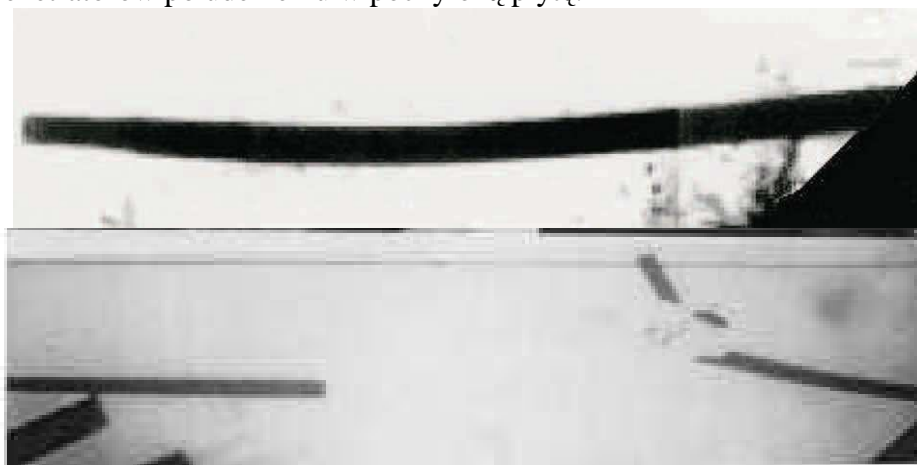
Taka konstrukcja penetratora charakteryzuje się zmniejszoną odpornością na obciążenia gnące występujące podczas:

- wibracji towarzyszących przyśpieszeniom pocisku w lufie,
- odrzucania segmentów sabotu po wylocie pocisku z lufy,
- obciążeń poprzecznych penetratora na torze lotu,
- penetracji pancerza kompozytowego zawierającego elementy o różnych gęstościach (w tym wolne przestrzenie).



Rys.2.3. Ugięcie penetratora ($l/d=40$) w odległości 20 m od wylotu lufy (fot. ISL).

Szczególnie naprężenia zginające towarzyszące uderzeniu penetratora w pancerz niejednokrotnie powodują złamanie penetratora, jego fragmentację w pancerzu, a w efekcie końcowym zmniejszenie głębokości przebicia. Identyfikacja tego problemu zostanie przedstawiona w kolejnych publikacjach. Na rysunku 2.4 przedstawiono efekty ugięcia oraz złamania penetratorów po uderzeniu w pochyloną płytę.



Rys.2.4. Efekt zgięcia (powyżej) i złamania (poniżej) penetratora podczas uderzenia w pochyloną płytę.

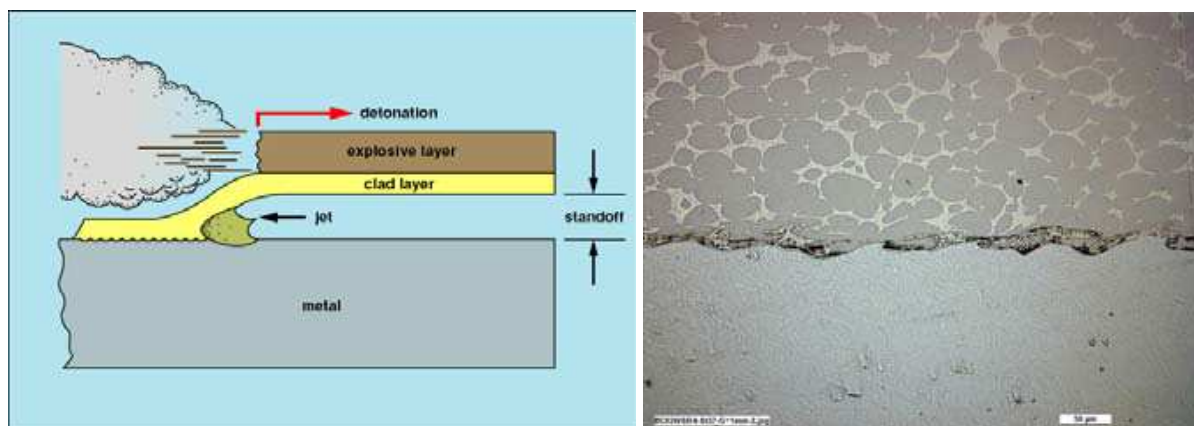
3. Możliwości zwiększenia odporności na zginanie wydłużonego penetratora pocisku podkalibrowego.

Jedną z możliwości rozwiązania przedmiotowego problemu odporności na zginanie wydłużonego penetratora pocisku podkalibrowego podczas uderzenia w pancerz jest zastosowanie w konstrukcji pocisków podkalibrowych penetratorów wolframowych z koszulką stalową [5].



Rys.3.1. Penetratory koszulkowe pocisków podkalibrowych.

Dotychczas w procesie łączenia wolframowych rdzeni z koszulką stalową stosowano kucie lub spawanie laserowe. Jednakże czasochłonność oraz uzyskiwana jakość i jednorodność połączenia koszulki z rdzeniem nie zawsze gwarantowały prawidłowe funkcjonowanie pocisku w czasie strzału. W związku z tym zaczęto stosować technikę wybuchowego nakładania koszulki [6] Na rys.3.2 przedstawiono schemat procesu wybuchowego łączenia koszulki z rdzeniem.



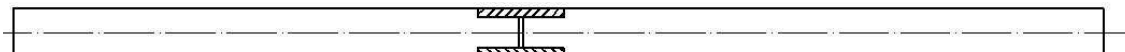
Rys.3.2. Z lewej: schemat procesu wybuchowego łączenia koszulki stalowej z rdzeniem. Z prawej: strefa połączenia koszulki z rdzeniem w powiększeniu.

W porównaniu do penetratorów monoblokowych - „koszulkowe” charakteryzują się zmniejszonym poziomem vibracji zginających, występujących w momencie uderzenia w pancerz. Ponadto podczas penetracji pancerza penetrator koszulkowy drąży krater o nieco mniejszej średnicy niż penetrator monoblokowy.

Jednakże rozwiązanie to, z konstrukcyjnego punktu widzenia, posiada istotną wadę. W związku z zastosowaniem w koszulce materiału o mniejszej gęstości niż materiał rdzenia

(spiek wolframu) penetrator koszulkowy musi posiadać znacznie większą długość niż penetrator monoblokowy o tej samej masie i średnicy. Przykładowo dla penetratora monoblokowego o $l/d=30$ odpowiednim jest penetrator koszulkowy o $l/d=40$. Stąd trudnym jest zastosowanie tej koncepcji w przypadku kinetycznej podkalibrowej amunicji czołgowej, gdzie długość penetratora jest obecnie silnie ograniczona wymiarami magazynów amunicji znajdujących się w czołgach.

Ze względu na powyższe ograniczenia w WITU, przyjęto koncepcję penetratora pocisku podkalibrowego składającego się z dwóch segmentów wykonanych ze spieku na osnowie wolframowej połączonych tuleją wykonaną ze stali charakteryzującą się lepszymi (niż spiek) własnościami sprężysto-plastycznymi, szczególnie pożądanymi podczas obciążeń zginających (rys. 3.3).



Rys.3.3. Koncepcja penetratora pocisku podkalibrowego.

Dla tej konstrukcji penetratora podlegającego obciążeniom zginających, dopuszczana są nie tylko odkształcenia sprężyste stalowej tulei penetratora, lecz także jej deformacja plastyczna w wyniku, której nastąpi redukcja naprężeń zginających bez możliwości pęknięcia penetratora.

Dodatkowo zastosowanie tulei łączącej wykonanej ze stali, pozwoli na znaczne zmniejszenie lub wyeliminowanie propagacji wzdłużnej 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 [7]. Szczegółowa analiza porównawcza stanu naprężeń w jednolitych i segmentowych penetratorach pocisków podkalibrowych zostanie przedstawiono w kolejnych publikacjach.

Literatura

- [1] W. LANZ, W. ODERMATT, DR. G.WEIHRAUCH, *Kinetic energy projectiles: Development history, state of the art, trends*. Materiały z 19 Międzynarodowego Sympozjum Balistycznego, Interlaken-Szwajcaria, 7–1 maja 2001, s. 1191-1197.
- [2] H. F. LEHR, E. WOLLMANN, W. LANZ, K. STERZELMEIER, *On behavior of long-rod penetrators undergoing lateral accelerations*. Materiały z 19 Międzynarodowego Sympozjum Balistycznego, Interlaken-Szwajcaria, 7–1 maja 2001, s. 1141-1150.
- [3] Z. DYŁĄG, A. JAKUBOWICZ, Z. ORŁOŚ, *Wytrzymałość materiałów-tom I*, WNT, Warszawa, 1999
- [4] K.VAHEDI, H.ZOHOOR, A. NEZAMABADI, M. ZOLFAGHARI, *Performance optimization of long rod penetrator penetrating into a semi-infinite target considering Bendig characteristics*. Turkish J.Eng. Env. Sci. 33 (2009), 9-20.
- [5] H.J.ERNST, W. LANZ, T.WOLF, *Penetration comparison of $l/d=20$ and 30 mono-block penetrators with $l/d=40$ jacketed penetrators in different target materials*. Materiały z 19 Międzynarodowego Sympozjum Balistycznego, Interlaken-Szwajcaria, 7–1 maja 2001, s. 1151-1157.

- [6] N. VAN DER MEER. M. DIJKSTRA, E. CARTON, *Performance and production of jacketed penetrators having different jacket thicknesses*. Materiały z 24 Międzynarodowego Sympozjum Balistycznego, Nowy Orlean-USA, 22–26 września 2008, s. 785-793.
- [7] M. MAGIER, *Koncepcja czołgowego pocisku podkalibrowego nowej generacji o zwiększonej zdolności przebicia pancerzy współczesnych czołgów*. Biuletyn PTU WITU nr 2/2007, zeszyt 102, s. 69-80. Zielonka, 2007r.