



## ZJAWISKO FORMOWANIA PŁASZCZYZN ADIABATYCZNEGO ŚCINANIA W PROBLEMATYCE PENETRACJI

### *THE ROLE OF ADIABATIC SHEAR BANDS EFFECT IN PENETRATION PROCESS*

Mariusz MAGIER

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka  
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyński St., 05-220 Zielonka, Poland  
Author's e-mail address: magierm @witu.mil.pl

DOI 10.5604/01.3001.0012.8308

**Streszczenie:** W artykule przeanalizowano zjawisko formowania płaszczyzn adiabaticznego ścinania, zachodzące w procesach charakteryzujących się bardzo dużymi deformacjami struktury rozpatrywanego materiału. Na przykładzie analizy porównawczej zjawiska wnikania pocisków z zubożonego uranu i spieku na osnowie wolframowej, określono wpływ płaszczyzn adiabaticznego ścinania na proces penetracji i przedstawiono możliwości w zakresie modyfikacji struktury spieków na osnowie wolframowej, które mogą mieć decydujący wpływ na zwiększenie zdolności penetracji. Niniejsze analizy przeprowadzono na podstawie przeglądu literaturowego.

Słowa kluczowe: pasma adiabaticznego ścinania, penetracja, szybkość odkształceń

### 1. Wprowadzenie

Od wielu lat prowadzone są w świecie prace nad zwiększaniem zdolności przebicia pancerza przez pociski przeciwpancerne o działaniu kinetycznym. Głębokość penetracji tego rodzaju amunicji zależy przede wszystkim od: dynamicznych twardości  $H_p$  i gęstości  $\rho_p$  materiału pocisku oraz dynamicznych twardości  $H_t$  i gęstości  $\rho_t$  materiału pancerza, jednostkowej masy pocisku odniesionej do pola maksymalnego jego przekroju poprzecznego  $\rho_p L$  ( $L$  – długość penetratora) oraz prędkości uderzenia  $V_p$ . W celu uzyskania możli-

**Abstract:** The phenomenon of creation of adiabatic shear bands occurring at extreme strains of investigated material is analysed in the paper. The effects of penetration for projectiles made of depleted uranium and tungsten sinters were compared to analyse an influence of the adiabatic shear bands into the process of penetration and to show some possibilities for structural modification of tungsten sinters increasing the penetration capabilities. The comparative analyses were conducted on the base of literature review.

Keywords: adiabatic shear bands, penetration, strain rate

### 1. Introduction

For many years the investigations have been carried out in the world to increase the penetrating capabilities of kinetic anti-tank projectiles. Depth of penetration for such projectiles depends most of all on: the dynamic hardness  $H_p$  and the density  $\rho_p$  of projectile's material, and on the dynamic hardness  $H_t$  and the density  $\rho_t$  of armour's material, unit mass of the projectile referred to the area of its cross section  $\rho_p L$  ( $L$  – the length of penetrator), and on the incidence velocity  $V_p$ . In order

wie dużych wartości parametrów  $\rho_p L$  i  $H_p$ , rdzenie wykonuje się najczęściej z wysokowytrzymałych stopów ciężkich: spieki z osnową wolframową WHA o gęstości  $\rho \approx 17500 \text{ kg/m}^3$  oraz zubożony uran DU o gęstości  $\rho \approx 19000 \text{ kg/m}^3$  [1].

Opracowanie pod koniec lat 60-tych amunicji typu APFSDS (*armour piercing fin stabilised discarding sabot*) do armat o gładkim wewnętrznym przewodzie lufy stało się przełomem w problematyce zwiększania głębokości przebicia pancerzy czołgów. Możliwości osiągnięcia w armatach gładkolufowych prędkości początkowej pocisków APFSDS do 1800 m/s oraz zwiększenie smukłości ( $l/d$ ) penetratora powyżej wartości 10 wpłynęły na znaczne zwiększenie zdolności przebicia pancerzy (w porównaniu do pocisków poprzednich generacji). Początkowo jako materiał penetratora stosowano stal o wysokich właściwościach mechanicznych. Następnie opracowano pociski APFSDS z penetratorami stalowymi z rdzeniem węglkowo-wolframowym.

to get possibly high values of  $\rho_p L$  and  $H_p$ , the cores are usually made of highly resistant heavy alloys: the tungsten sinters WHA with density  $\rho \approx 17500 \text{ kg/m}^3$  and depleted uranium DU with density  $\rho \approx 19000 \text{ kg/m}^3$  [1].

APFSDS (*Armour Piercing Fin Stabilised Discarding Sabot*) ammunition developed at the end of the sixties for smooth bore guns was a breakthrough in questions referring to the tank armour penetration depth. A significant increase of armour penetration depth (against the projectiles of former generation) was provided by possibilities for reaching muzzle velocities up to 1800 m/s for the smooth gun APFSDS projectiles and for getting the penetrator's slenderness ( $l/d$ ) above 10. The steel with high mechanical performance was used first for the penetrators. In the next step APFSDS projectiles with carbide-tungsten cores were developed.

Tabela 1.1 Podstawowe właściwości mechaniczne spieków wolframu

Table 1.1. Basic mechanical properties for tungsten sinters

Rok wdrożenia spieku <i>Year of sinter deployment</i>	1970	1978	1985	1995
Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ <i>Tensile strength (MPa)</i>	800	1200	1450	1700
Granica plastyczności $R_e$ <i>Plasticity limit (MPa)</i>	$\approx 650$	1000	1400	1650
Wydłużenie $A_5$ <i>Extension (%)</i>	1÷4	$\approx 6$	$\approx 8$	$\approx 8$

W miarę rozwoju technologii spiekania (stosowanie dodatków: nikiel, żelazo, kobalt, miedź, magnez) i obróbki mechanicznej spieków na osnowie wolframowej (m.in. kucie obwiedniowe) wydłużenie penetratora rosło od 10 do ponad 30. W tabeli nr 1.1 przedstawiono zestawienie podstawowych właściwości mechanicznych spieków wolframu od lat 70-tych [2].

Dla małej średnicy rdzenia (23÷45 mm) i wydłużenia  $l/d \sim 30$  oraz znacznej prędkości uderzenia pocisku w pancerz osiągnięta jest duża koncentracja czasowo-przestrzenna energii, która decyduje o głębokości penetracji. Współczesne pociski podkalibrowe z od-

Development of sintering technology (deployment of such additives as nickel, iron, cobalt, copper and magnesium) and mechanical processing of tungsten sinters (e.g. perimeter forging) have made the slenderness of the penetrator increase from 10 to above 30. Table 1.1 [2] shows an overview of basic mechanical properties for tungsten sinters starting from the 70-ties.

High level of time-spatial concentration of energy deciding on the depth of penetration is received for small diameters of rods (23÷45 mm), and for elongations  $l/d \sim 30$ , and for projectile significant veloci-

rzucanym sabotem, stabilizowane brzechwo-wo, odznaczają się małym spadkiem prędkości pocisku na torze lotu, co wynika z geometrii pocisku (dla najnowszych konstrukcji wynosi on ok. 50 m/s na odległości 1000 m). Dla prędkości początkowych z zakresu (1500 ÷ 1800) m/s prędkości uderzenia w cel są znaczne na odległościach nawet powyżej 2000 m.

Możliwości dalszego zwiększania głębokości penetracji przez czołgowe pociski podkalibrowe są ograniczone przede wszystkim przez:

- własności wytrzymałościowe materiałów konstrukcyjnych armat i amunicji,
- własności balistyczne stosowanych materiałów miotających,
- wymiary geometryczne komór nabożowych i automatów ładujących w czołgach będących obecnie w uzbrojeniu.

Jednym z potencjalnych kierunków rozwoju amunicji tego typu są m.in. prace naukowo-badawcze w zakresie modyfikacji składu i procesów obróbki mechanicznej materiału konstrukcyjnego penetratora w kierunku uzyskania odpowiedniej struktury metalograficznej, zapewniającej uzyskanie efektu „samoostrzenia się” (*self-sharpening effect*) penetratora w pancerzu. Zjawisko to zostało opisane w dalszej części pracy.

## 2. Identyfikacja zjawiska formowania płaszczyzn adiabatycznego ścinania

Zjawiska adiabatycznego ścinania, niestabilności regionów ścinania czy lokalizacja pasm ścinania będących głównymi wyróżnikami płaszczyzn adiabatycznego ścinania, występują przede wszystkim w procesach charakteryzujących się bardzo dużymi deformacjami struktury rozpatrywanego materiału. Występują one przede wszystkim podczas: formowania się kraterów pod wpływem uderzenia innego obiektu, w trakcie dynamicznych testów udarowych (np. test *Taylor*a i *Hopkinsona*-rys.1), penetracji z uwzględnieniem płynięcia materiałów penetratora i płyty czy *pluggingu* (wybijania korka w płycie pancernej przez pocisk), a także wykrawania, obróbki mechanicznej, zgrzewania tarcowego [3].

ties at hitting into the armour. Present geometries of kinetic projectiles with discarded sabot and fin stabilisation are characterised by a low decrease of velocity on the flying path (it is ca. 50 m/s at 1000 m distance for the newest designs). For the muzzle velocities within the interval of (1500÷1800) m/s there are still significant velocities of hitting for targets placed above 2000 m.

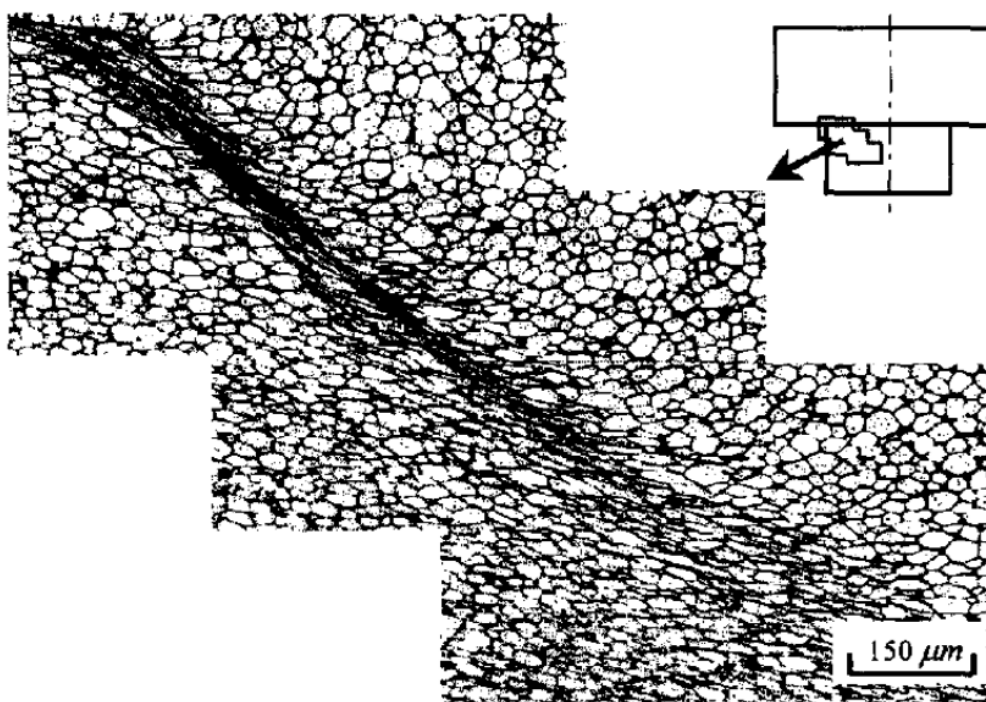
A further increase of the penetration depth by tank kinetic ammunition is most of all limited by:

- Strength properties of designing materials for guns and ammunition
- Ballistic characteristics of used projecting materials
- Geometrical volumes of cartridge chambers and loading automatic mechanisms in tanks being currently in service.

One of potential developing trends for this type of ammunition concerns the scientific-development projects modifying the composition and mechanical treatment of the penetrator's structural material in order to get a “self-sharpening effect” inside the armour. The effect is presented in next chapters of the paper.

## 2. Identification of Conditions for Shear Bands Effect

The effects of adiabatic shears, instability of shear zones or the localisation of shear bands which are the main indicators of adiabatic shear bands occur most of all in the processes characterised by very high strains of the considered material structure. They usually take place at forming the craters through the impact of another object, at dynamic impact tests (e.g. *Taylor*'s and *Hopkinson*'s tests – fig.1), at the penetration considering the flow of penetrator's and plate's materials, or at the plugging (when a plug is driven out from the armour plate by the projectile) and also at cutting, mechanical treatment and joining by frictional heating [3].



**Rys. 1. Pasma adiabaticznego ścinania dla deformacji zachodzących podczas testu Hopkinsona w próbkach wykonanych ze spieku 93W-Ni-Fe [4]**

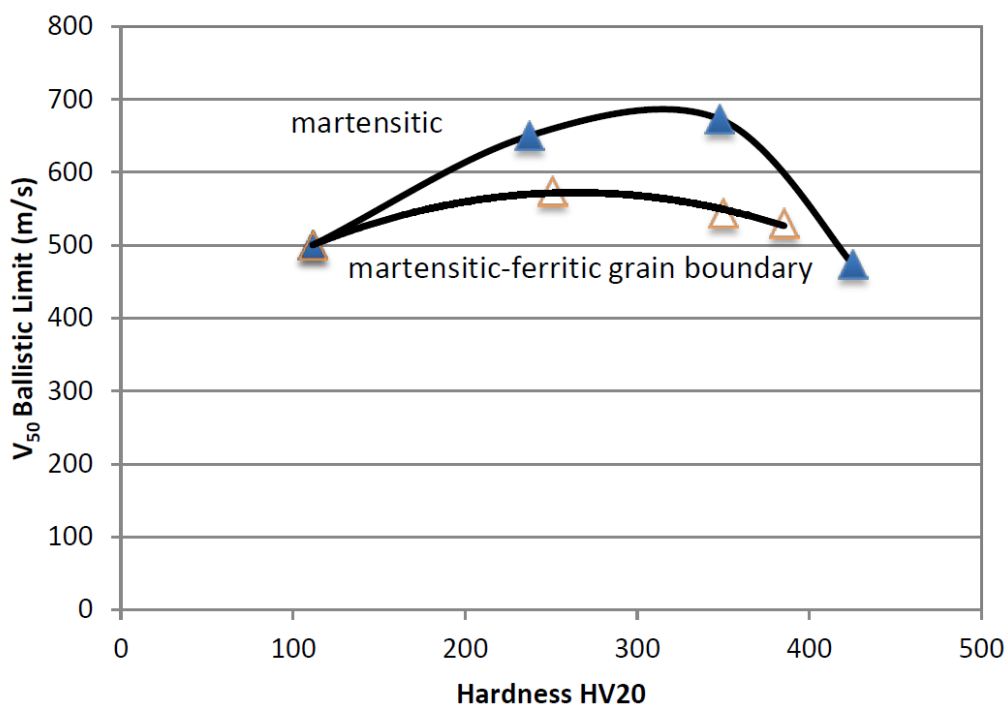
*Fig. 1. A band of adiabatic shear for deformations occurring at Hopkinson's test inside the samples made of 93W-Ni-Fe sinter [4]*

Podczas ww. zjawisk powstają duże odkształcenia, którym towarzyszą procesy dynamicznej rekrytalizacji i plastycznego płynięcia równoosiowych zrekrystalizowanych ziaren. Pasma adiabaticznego ścinania występują w obszarach, gdzie powstają uszkodzenia materiału lub w obszarach, gdzie nastąpiło już pełne umocnienie materiału (np. przez zgmiot). Umocnienie materiału oraz jego wrażliwość na szybkość odkształceń i zmiany temperatury, są głównymi czynnikami mającymi istotny wpływ na powstawianie stref plastycznego płynięcia i ścinania. Wraz ze wzrostem temperatury ( $\Delta T$ ) przemiany adiabaticznej następuje uplastycznienie termiczne materiału będące miejscem formowania się pasma adiabaticznego ścinania. Ciepło generowane w materiale podczas jego plastycznych deformacji (np. przy zderzeniu badanych obiektów) często nie ma możliwości (dzięki krótkiemu czasowi trwania zjawiska) transmitować się poza strefę odkształceń. Na przykładzie analizy parametrów wytrzymałościowych płyt pancernych zjawisko to może mieć istotny wpływ na ich odporność balistyczną, która wraz ze wzro-

The effects mentioned above produce great strains accompanied by processes of dynamical recrystallisation and a plastic flow of equally oriented recrystallised grains. The bands of adiabatic shear appear in the zones where the material has been entirely strengthened (e.g. by the squeeze) or the zones of material defects. The strengthening of the material and its sensitivity to the deformation rates and the temperature changes are the main factors which affect significantly the generation of zones of plastic flow and shear. An increase of temperature ( $\Delta T$ ) of the adiabatic transition makes the material get properties of thermal plasticity in a zone where the adiabatic shear band is formed. The heat generated inside the material at plastic deformations (e.g. at collision of investigated objects) often cannot be transferred (because of a short time of the event) beyond the zone of the flows. An analysis of resistance characteristics for the armour plates shows that the above effect may significantly affect their ballistic resistance which may drop with the

stem statycznej granicy wytrzymałości materiału może spadać. Na występowanie tego procesu znacznie wpływa struktura materiałowa [5]. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie wpływu twardości materiału na odporność balistyczną dla dwóch typów stali po ulepszeniu cieplnym: a) charakteryzującej się mikrostrukturą martenzytyczną, b) stali o mikrostrukturze ferrytyczno-martenzytycznej [6].

increase of material static strength limit. The material structure largely affects the occurrence of this process [5]. Figure 2 shows a comparison of dependence between the material hardness and ballistic resistance for two brands of steel after the thermal treatment: a) with martensitic microstructure, b) with martensitic-ferritic microstructure [6].

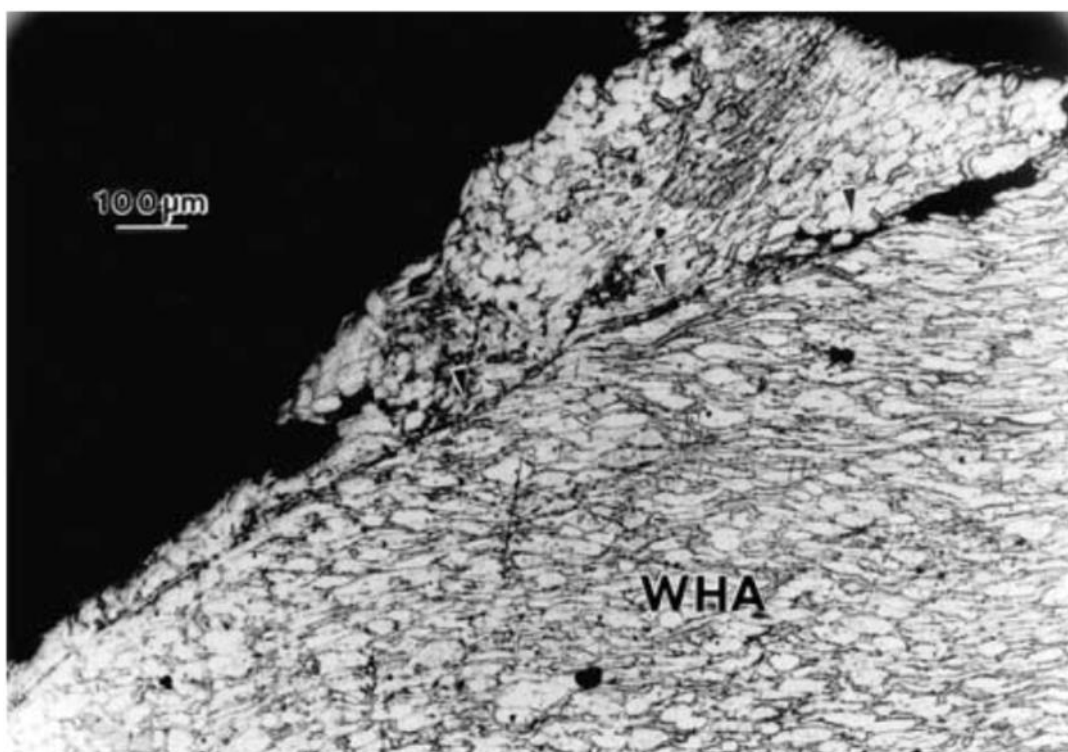


Rys. 2. Porównanie wpływu twardości materiału na odporność balistyczną dla dwóch typów stali po ulepszeniu cieplnym: a) charakteryzującej się mikrostrukturą martenzytyczną, b) stali o mikrostrukturze ferrytyczno-martenzytycznej [6]

Fig. 2. Comparison of dependence of the ballistic resistance on the material hardness for two brands of steel after thermal treatment: a) with martensitic microstructure, b) with martensitic-ferritic microstructure [6]

Na rysunku 3 przedstawiono materiał WHA po badaniach dynamicznych z uformowanym pasmem adyabatycznego ścinania [3]. Zjawisko to wystąpiło podczas penetracji płyty aluminiowej 7039 przez penetrator wykonany ze spieku WHA (93%W, 5% Fe, 2% Ni). Na poniższym zdjęciu przedstawiono w powiększeniu strukturę odłamka penetratora wyjętego z kanału penetracji z widocznym pasmem adyabatycznego ścinania.

An example of WHA material after dynamic tests with a formed adiabatic shear band is shown in Fig. 3 [3]. The effect has occurred at the penetration of 7039 aluminium plate by a penetrator made from the WHA sinter (93%W, 5% Fe, 2% Ni). Below a structure of a fragment removed from the penetrating channel is shown in the enlarged picture where the adiabatic shear bands are visible.



**Rys. 3. Pasma adiabatycznego ścinania w materiale penetratora WHA po procesie penetracji [3]**

*Fig. 3. An adiabatic shear band inside WHA penetrator after penetrating effect [3]*

### **3. Istota zjawiska formowania płaszczyn adiabatycznego ścinania w procesie penetracji**

Odnosząc się do zjawiska penetracji już w latach 90-tych autorzy pracy [7] wykonali testy porównawcze procesów penetracji pocisków cylindrycznych wykonanych z spieków na osnowie wolframowej i z zubożonego uranu. Zaobserwowano przede wszystkim większą głębokość penetracji i mniejszą średnicę kanału w przypadku pocisku wykonanego z zubożonego uranu (rys.4).

Zjawisko zostało wyjaśnione przez autorów w następujący sposób. W porównaniu do spieku na osnowie wolframowej, penetratory wykonane ze zubożonego uranu mają szczególną właściwość, polegającą na ich „samoostreniu się” podczas penetracji pancerza (rys. 4a). Występowanie tego efektu wpływa na zwiększenie głębokości przebicia w stosunku do penetratorów wykonanych ze spieku na osnowie wolframowej (rys. 4b), mających tendencję do „grzybkwania” w pancerzu. Zjawisko samoostrenia się penetratora podczas wnikania

### **3. Principle of Adiabatic Shear Bands Effect at Process of Penetration**

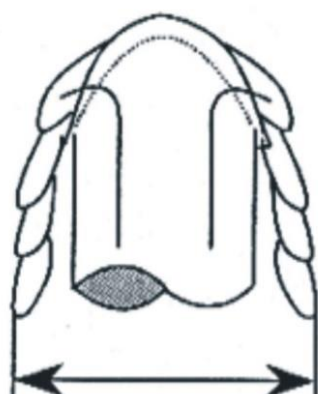
Regarding the effect of penetration the authors of publication [7] already in the 90-ties performed comparative tests of penetrating processes for cylindrical projectiles made of depleted uranium and tungsten sinters. Most of all it was noted that the projectile made of depleted uranium provided a greater depth of penetration at lower diameter of the channel (Fig.4).

The effect was explained by authors in the following way. The penetrators made of depleted uranium have contrary to tungsten sinter a specific feature of “self-sharpening” during the penetration of an armour (Fig. 4a). This effect increases their depth of penetration against penetrators made from the tungsten sinter (Fig. 4b) which show a tendency of “mushrooming” inside the armour. The self-sharpening effect is caused by the above



w pancierz jest skutkiem występowania ww. procesu formowania się płaszczyzn adiabatycznego ścinania, będącego wynikiem zastosowania odpowiedniego procesu technologicznego odkuwania prętów uranowych oraz niskiej przewodności cieplnej zubożonego uranu. W przypadku spieków na osnowie wolframowej zjawisko formowania płaszczyzn adiabatycznego ścinania następuje wolniej i nie powoduje ostrzenia przedniej części penetratora.

mentioned process of formation of adiabatic shear bands as a result of deployment of a specific process of technological forging for uranium rods and of a low thermal conductivity for depleted uranium. For the tungsten based sinters the effect of formation of adiabatic shear bands runs slower and without sharpening the penetrator frontal part.



Mniejsza średnica wnikania /  
Lower diameter of penetration

a) Penetrator ze zubożonego uranu (DU) /  
Penetrator made of depleted uranium (DU)



Większa średnica wnikania /  
Greater diameter of penetration

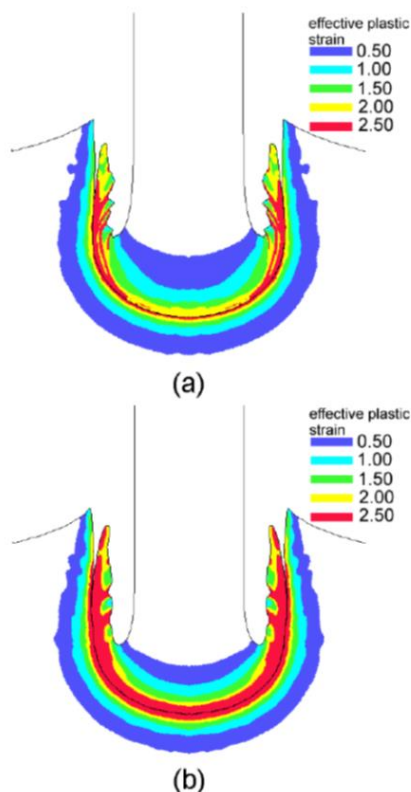
b) Penetrator ze spieku na osnowie wolframowej (WHA) /  
Penetrator made from tungsten sinter (WHA)

**Rys. 4. Porównanie mechanizmów odkształcania się wierzchołka penetratora wykonanego ze zubożonego uranu (DU) i spieku na osnowie wolframowej (WHA) [7]**

**Fig. 4. Comparison of penetrator head deformation mechanisms for penetrators made of depleted uranium (DU) and tungsten sinter (WHA) [7]**

W pracy [8] autor na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych, porównał m.in. efektywne odkształcenia plastyczne w obszarze deformacji penetratora i pancierza dla pocisku z zubożonego uranu i ze spieku na osnowie wolframowej. Wskazał na występowanie wąskich regionów silnych deformacji plastycznych w regionie styku zubożonego uranu i materiału pancierza. W przypadku spieku na osnowie wolframowej tego typu regiony występowały w mniejszej ilości i nie tak wąskie jak w przypadku zubożonego uranu. Dla tegoż materiału strefa wypływu składa się ze zdeformowanych cząstek materiału oddzielonych pasmami ścinania od materiału niezdeformowanego (rys. 5a), zaś dla spieku na osnowie wolframowej występuje ciągłe przejście od materiału niezdeformowanego do materiału zdeformowanego (rys. 5b).

On the basis of performed numerical simulations the author has presented in [8] a comparison of effective plastic strains in the zones of penetrator and armour deformations for projectiles made of depleted uranium and tungsten sinter. The author has indicated the existence of narrow regions of strong plastic deformations in the boundaries between the depleted uranium and the material of armour. For the tungsten based sinters these regions were less numerous and not so narrow as for the depleted uranium. For this material the outflow zone is composed from deformed particles of material separated by the shear bands from the undeformed material (Fig. 5a) whereas for the tungsten sinter there is a steady transition between undeformed and deformed material (Fig. 5b).



**Rys. 5. Zobrazowanie efektywnych odkształceń plastycznych penetratorów wykonanych ze zubożonego uranu (a) i spieku na osnowie wolframowej (b) [8]**

**Fig. 5. Illustration of effective plastic strains for penetrators made of depleted uranium (a) and tungsten sinter (b) [8]**

Pomimo ww. zalet penetratorów wykonanych z zubożonego uranu, znacznym problemem jest odpowiednie przechowywanie amunicji, zapewniające minimalizację lub wręcz eliminację promieniowania szkodliwego dla załogi czołgu i innych eksploatorów tej amunicji.

Stąd niezmienną jest potrzeba prowadzenia prac naukowo-badawczych nad spiekami na osnowie wolframowej stanowiących dziś podstawowy materiał konstrukcyjny penetratorów przeciwpancernych pocisków czołgowych.

Dużą szansą na zwiększenie własności penetracyjnych spieków na osnowie wolframowej są zaawansowane metody obróbki spieków, podczas których uzyskuje się parametry zbliżone do parametrów zubożonemu uranu t.j.: udarność i przewodność cieplna, które mogą mieć wpływ na zmniejszenie efektu „grzybkowania”.

Ponadto gęstości uzyskiwane w spiekach na osnowie wolframowej na przełomie ostatnich 20 lat wzrosły z średnio  $17,1 \text{ g/cm}^3$  do  $17,6 \text{ g/cm}^3$  zmniejszając w widoczny sposób dystans do zubożonego uranu ( $19 \text{ g/cm}^3$ ).

Tego typu prace prowadzone od kilkunastu lat w wyspecjalizowanych ośrodkach badawczych m.in. w Korei Płd. Ukierunkowane

Despite the above advantages of penetrators made of depleted uranium a suitable storing of the ammunition is also a problematic question as the minimisation or even the elimination of the radiation harmful for the crew and other users of the ammunition has to be secured.

For this reason there is still a demand for scientific-research projects on the sinters based on tungsten which are now the main designing material for antitank projectiles of tank guns.

A great chance for increasing penetrating capacities of sinters prepared on the base of tungsten may be provided by the advanced methods of treatment of the sinters securing the similar characteristics of the impact strength and thermal conductivity as for the depleted uranium and reducing the “mushrooming” effect.

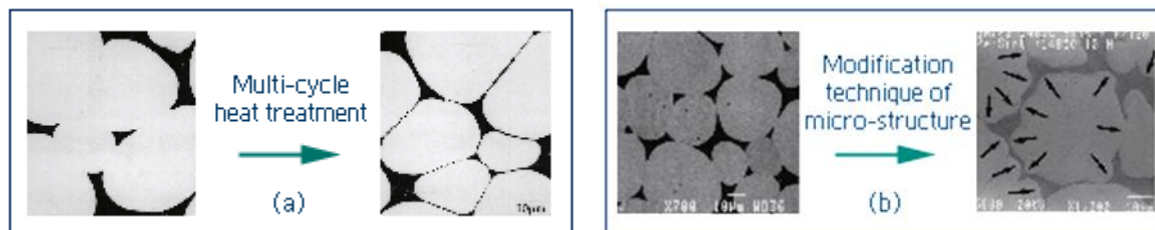
Moreover the densities which have been received for tungsten sinters for recent 20 years increased on average from  $17.1 \text{ g/cm}^3$  to  $17.6 \text{ g/cm}^3$  what visibly reduces a distance to the depleted uranium ( $19 \text{ g/cm}^3$ ).

Such projects have been carried out for recent dozen years by some specialised research centres e.g. in the South Korea.



są one przede wszystkim na optymalizację procesu obróbki cieplnej (rys. 6a) oraz modyfikację mikrostruktury spieku na osnowie wolframowej (rys. 6b).

They are focused most of all on the optimisation of thermal treatment (Fig. 6a) and modification of tungsten sinter microstructure (Fig. 6b).



**Rys. 6. Zobrazowanie procesów wielokrotnej obróbki cieplnej (a) oraz modyfikacji mikrostruktury (b) spieku na osnowie wolframowej [9]**

**Fig. 6. Illustration of microstructure modification for: (a) Multi-cycle heat treatment, (b) Tungsten based sinters [9]**

Zastosowanie tych operacji ma na celu modyfikację struktury spieku w postaci zagęszczenia ziaren wolframu i ich rozrostu, co w swoim założeniu przyczyni się do eliminacji efektu „grzybkowania” i jednoczesnego uzyskania efektu „samoostrzenia się” penetratora w pancerzu [10], czyli generowaniu się pasm adiabatycznego ścinania w sposób maksymalnie zbliżony do zjawiska zachodzącego w zużożonym uranie.

Powyższa metoda obecnie wydaje się najbardziej prawdopodobnym w realizacji kierunkiem rozwoju spieków na osnowie wolframowej w celu osiągnięcia parametrów porównywalnych lub (być może) przewyższających materiały na bazie zużożonego uranu.

Znamiennym jest fakt, że są to procesy możliwe do wykonania w krajowych ośrodkach naukowo-badawczych i produkcyjnych, które obecnie zaangażowane są w opracowanie prętów wolframowych do podkalibrowej amunicji czołgowej w ramach projektu pt. „Opracowanie i wykonanie demonstratorów technologii krytycznych elementów do nowej generacji amunicji czołgowej 120 mm” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

#### 4. Podsumowanie

Obecnie na podstawie dokumentacji opracowanej w Instytucie Mechaniki i Poligrafii, Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej (współkonsorcjanta

Deployment of these processes is aimed to get a modification of sinter's structure by a denser packing of tungsten grains and by their growth what presumably may provide the elimination of the “mushrooming” effect and at the same time the appearance of penetrator's “self-sharpening” effect inside the armour [10], or in other words to produce the adiabatic shear bands similar to the effect occurring in the depleted uranium.

The above method seems now to be a most promising direction for development of tungsten sinters to get similar (or better) characteristics than the materials received on the base of depleted uranium.

It is worth to note that these processes can be deployed by the home production and scientific-research centres which are currently involved in the development of tungsten rods for the tank kinetic ammunition under the project „Development and Fabrication of Technology Demonstrators for Critical Components of New Generation 120 mm Tank Ammunition” financed by the National Centre of Researches and Development.

#### 4. Summary

A testing lot of tungsten rods has been currently developed on the basis of documentation prepared by the Institute of Mechanics and Polygraph at the Faculty of

w ww. projekcie) i z uwzględnieniem wymagań sformułowanych w założeniach dla demonstratora technologii prętów wolframowych (stanowiących część zadania realizowanego w ramach ww. projektu), opracowywana jest partia doświadczalna prętów wolframowych z wykorzystaniem instalacji produkcyjnych znajdujących się w Zakładach Metalowych MESKO S.A.

Partia ta zostanie poddana badaniom poligonowym (w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia) oraz laboratoryjnym m.in. w zakresie struktury metalograficznej spieku, co poszerzy w znaczący sposób wiedzę praktyczną w zakresie wpływu odróbki mechanicznej i cieplnej prętów ze spieku na osnowie wolframowej na strukturę metalograficzną oraz pozwoli sformułować podstawy optymalizacji procesów obróbki mechanicznej i cieplnej, prowadzących do uzyskania pożądanego efektu „samoostrzenia się” penetratora w pancerzu, będącego wynikiem odpowiedniego formowania pasm adiabaticznego ścinania.

Rezultaty dalszych prac będą zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

Production Engineering of the Warsaw's University of Technology (a member of consortium acting for the above project) and by accounting the requirements formulated in the assumptions for tungsten rods technology demonstrator (being a part of the assignment performed in the frame of the above project) and by using the production installations placed in the Metal Plants MESKO S.A.

The lot will be tested on the range (in the Military Institute of Armament Technology) and in the laboratory between all for the sinter metallographic structure what may significantly increase the practical knowledge on the influence of mechanical and heat treatment of tungsten sinter rods on the metallographic structure and may help to formulate conditions for optimisation of heat and mechanical treatment to get the demanded effect of penetrator “self-sharpening” inside the armour through a suitable formation of the adiabatic shear bands.

The results of further investigations will be presented in next publications.

*Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w latach 2016-2019 jako projekt realizowany na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa zgodnie z umową nr DOB-BIO8/05/01/2016 z dnia 14.12.2016 r.*

*The scientific project financed by the National Centre of Researches and Development within 2016-2019 as a project performed in favour of the state security and defence according to agreement No DOB-BIO8/05/01/2016 dated on 14 December, 2016.*

## **Literatura / Literature**

- [1] M. Magier, Metody oszacowania głębokości przebicia pancerza przez pociski kinetyczne, (2007), Biuletyn PTU WITU nr 1, zeszyt 101, s. 103-116.
- [2] M. Magier, Oddziaływanie jednolitych i segmentowych penetratorów kinetycznych pocisków podkalibrowych na pancerze, Wydawnictwo Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, Zielonka 2014, s.150.
- [3] L. E. MURR, E. A. TRILLO, S. PAPPU, C. KENNEDY, Adiabatic Shear Bands and Examples of Their Role in Severe Plastic Deformation, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE 37 (2002),3337– 3360.
- [4] Shigang W., Jilin Y., JianrongL., Yongchi L., Shisheng H., Influence of Stress Condition on Adiabatic Shear Localization of Tungsten Heavy Alloys, International Journal of Im-

- pact Engineering 26 (2001), 843-852.
- [5] S.J. Cimpoeru, The Mechanical Metallurgy of Armour Steels, Land Division Defence Science and Technology Group, DST-group-TR-3305, Australia, 2016.
- [6] Z. Shah Khan, Unpublished DST Group Research. Australian Defence Standard, DEF(AUST) 8030, Rolled Armour Plate, Steel (3-35 mm).
- [7] L.S. Magness and T. Farrand, Deformation Behaviour and Its Relationship to the Penetration Performance of High-density KE Penetrator Materials, Proc. Army Science Conf., West Point, NY, 1990.
- [8] John Boyet Stevens, Finite Element Analysis of Adiabatic Shear Bands in Impact and Penetration Problems, Master of Science in Engineering Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va, 1996.
- [9] Joon-Woong N., Eun-Pyo K., Heung-Sub S., Woon-Hyung B., Kil-Sung Ch.: Matrix Penetration of W/W Grain Boundaries and Its Effect on Mechanical Properties of 93W-5.6Ni-1.4Fe Heavy Alloy, Metallurgical Transactions A. 24A, (1993) pp. 2411÷2416.

