



Badania balistyczne wolframowych stopów ciężkich skłonnych do fragmentacji wykonanych z różnie przygotowanych mieszanek

Marcin KONIECZNY¹, Mieczysław KACZOROWSKI^{2*},
Leszek CYBULA²

¹15 Rejonowe Przedstawicielstwo Wojskowe, ul. Radiowa 49, 01-499 Warszawa,

²Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska

ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa,

* autor korespondencyjny, e-mail: m.kaczorowski@wip.pw.edu.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 23.06.2015. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 10.12.2014

DOI: 10.5604/20815891.1157776

Streszczenie. W artykule zamieszczono wyniki badań balistycznych wolframowych stopów ciężkich (WSC) skłonnych do fragmentacji. Materiałem badawczym były próbki w formie zmodyfikowanych pocisków naboju kal. $7,62 \times 54$ mm do karabinu „Mosin” wykonane ze stopów ciężkich otrzymanych z mieszanek proszków W, Ni, Fe, Co z dodatkiem ceramiki. WSC uzyskano z wyprasek spiekanych z udziałem fazy ciekłej lub w fazie stałej, w atmosferze wodorowej. Testy z zakresu balistyki końcowej przeprowadzono zgodnie z procedurą badawczą PBO-50. Otrzymane rezultaty umożliwiają przedstawienie skłonności WSC do fragmentacji w postaci graficznej. W pracy zaproponowano ilościowe kryterium oceny podatności WSC na fragmentację materiałów.

Słowa kluczowe: mechanika, wolframowe stopy ciężkie skłonne do fragmentacji, badania balistyczne

1. WSTĘP

Wolframowe stopy ciężkie, obok zastosowań cywilnych, są często wykorzystywane w przemyśle obronnym. Dzięki wyjątkowym właściwościom fizykomechanicznym, jak również dużej gęstości, stosuje się je jako materiał do wytwarzania rdzeni pocisków podkalibrowych zwanych często penetratorami kinetycznymi – KEP (ang. *Kinetic Energy Penetrators*). Amunicję tego typu zastosowano po raz pierwszy już podczas II wojny światowej, kiedy na polu walki pojawiły się czołgi o zwiększonej grubości pancerza [1, 2]. Początkowe wersje tej amunicji miały rdzenie z węgliku wolframu z niewielką domieszką niklu i/lub kobaltu (np. WC-Ni-Co). Jednakże, ze względu na niekorzystne właściwości balistyczne, stosunkowo małą prędkość i niewielki zasięg, rdzenie te zostały wyparte przez amunicję opartą na rdzeniach wykonanych ze stopów ciężkich. Początkowo do wytwarzania rdzeni stosowano stopy ze zubożonego uranu – DU (ang. *Depleted Uranium*), jednakże, z powodu zarzucanej im radioaktywności, są one coraz częściej zastępowane przez wolframowe stopy ciężkie typu: W-Ni-Fe oraz W-Ni-Co. W kolejnych latach amunicję podkalibrową poddano dalszej modernizacji, wprowadzając oddzielający się sabot – APDS (ang. *Armour Piercing Discarding Sabot*) dla pocisków stabilizowanych obrotowo i APFSDS (ang. *Armour Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot*) w przypadku pocisków stabilizowanych brzechwowo. Umożliwiło to zwiększenie penetracji pancerza o około 80% w stosunku do amunicji stosowanej poprzednio oraz dwukrotny wzrost zasięgu skutecznego.

Przewiduje się, że dalszy rozwój penetratorów wykonanych z WSC będzie przebiegał w dwóch kierunkach [3]. Pierwszy będzie polegał na dążeniu do zwiększenia gęstości energii uderzenia dzięki zwiększeniu prędkości pocisków, drugi – na opracowaniu nowych konstrukcji penetratorów. W przypadku pocisków pełnokalibrowych typu AP (ang. *Armour Piercing*) największą wagę przywiązuje się do zwiększenia energii kinetycznej przy uderzeniu w pancerz, co jest możliwe albo przez wzrost prędkości pocisku, albo przez zwiększenie jego masy. Wymaga to jednak zastosowania większej masy ładunku miotającego. W przypadku dział już eksploatowanych, masę ładunku miotającego można zwiększyć jedynie w niewielkim zakresie, ograniczonym wymiarami komory naboju i wytrzymałością lufy.

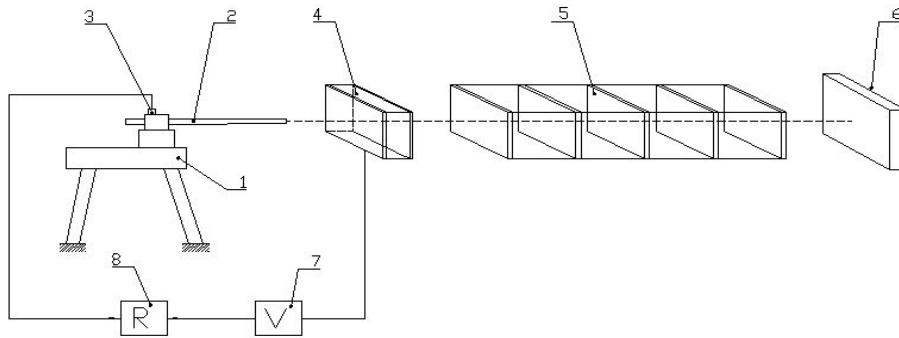
Obecnie w wielu placówkach naukowych – zarówno krajowych, jak i zagranicznych – trwają prace badawcze mające na celu zwiększenie właściwości wytrzymałościowych WSC przeznaczonych na rdzenie pocisków podkalibrowych poprzez dodanie do fazy wiążącej pewnej ilości Co lub Re [4-6]. Dodatki te przyczyniają się do wzrostu właściwości wytrzymałościowych rdzeni pocisków oraz uzyskania penetracji porównywalnej z tą, jaką uzyskuje się dla pocisków z rdzeniami ze zubożonego uranu.

Całkowicie odmienne podejście stosuje się w przypadku pocisków o skłonnościach do tzw. fragmentacji opóźnionej – FAPDS (ang. *Frangible Armour Piercing Discarding Sabot*). W tym przypadku dąży się do uzyskania materiału rdzenia, który po każdorazowym uderzeniu w przeszkodę ulega kaskadowemu rozpadowi na coraz mniejsze odłamki. Takie zachowanie przy uderzeniu uzyskuje się poprzez „osłabienie” typowych stopów (spieków) W-Ni-Fe. Efekt ten osiąga się za pośrednictwem wytworzenia w mikrostrukturze zaburzeń w postaci nieciągłości lub wprowadzenie do mikrostruktury stopu cząstek ceramicznych. Szczególnie efektywne są pory i cząstki o ostrych zakończeniach [7, 8], pełniące funkcję koncentratorów naprężeń, sprzyjających kaskadowemu rozpadowi rdzenia podczas obciążeń dynamicznych.

Reasumując to krótkie wprowadzenie, należy odnotować, że prace nad amunicją o właściwościach fragmentujących bazującą na WSC są ukierunkowane na polepszenie jej parametrów taktyczno-technicznych, a ich celem jest zwiększenie efektywności na współczesnym polu walki. Niemniej jednak wyniki badań balistycznych, z wiadomych względów, nie są publikowane, a jeśli już – to niezmiernie rzadko. W niniejszej pracy zaprezentowano rezultaty badań podatności wolframowych stopów ciężkich na fragmentację, których skład chemiczny, metodę wytwarzania i mikrostrukturę opisano w pracach [9, 10].

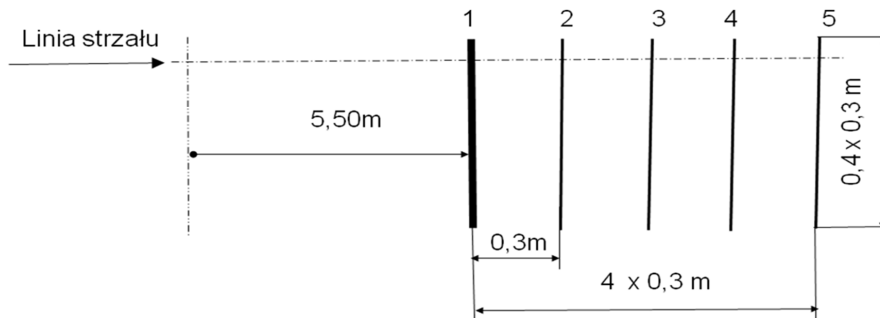
2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Badania podatności wolframowych stopów ciężkich na fragmentację przeprowadzono zgodnie z procedurą PBO-50 [11]. Badania wykonano na stanowisku stacjonarnym przy użyciu lufy balistycznej kal. $7,62 \times 54$ mm do karabinu „Mosin” zamocowanej w uchwycie UPB (rys. 1). Badania polegały na strzelaniu do modelu celu wielowarstwowego (rys. 2) specjalnymi pociskami o kalibrze 7,62/6 mm, sporządzonymi z WSC zawierających niewielki dodatek zdyspergowanej ceramiki. Szczegółowy skład chemiczny tych stopów oraz metodę wytwarzania opisano w pracach [8, 10]. Wytworzone stopy oznaczono odpowiednio symbolami: S1, S2, S3 oraz S4. Pociski podkalibrowe z rdzeniami o wymiarach $\phi 6 \times 14$ mm ze stopów ciężkich przeznaczonych do badań właściwości rozpryskowych zaopatrywano w saboty z tworzywa sztucznego i umieszczano w komorze naboju lufy balistycznej w sposób pokazany schematycznie w procedurze PBO-50. Podczas badania sprawdzano pełne przebicie na płycie I i II oraz fragmentację na płytach III, IV i V. Pomiar prędkości pocisków przeprowadzano za pomocą bramek fotoelektrycznych, zaś ciśnienia gazów prochowych – za pomocą czujnika piezoelektrycznego.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego: 1 – stojak do badań balistycznych, 2 – lufa balistyczna kal. $7,62 \times 54$ mm karabinu „Mosin”, 3 – urządzenie odpalające, 4 – zestaw bramek fotoelektrycznych typ BP-02 o bazie pomiarowej 2 m, 5 – model celu składający się z płyt aluminiowych zestawionych według wymagań przedstawionych w PBO-50, 6 – kulochwyt, 7 – rejestrator prędkości pocisku badawczego, 8 – rejestrator cyfrowy typ RC-06 współpracujący z czujnikiem ciśnienia Kistler 6201

Fig. 1. Scheme of laboratory test stand: 1 – column for ballistic experiment, 2 – ballistic barrel cal. $7,62 \times 45$ of “Mosin” rifle, 3 – shooting equipment, 4 – set of photoelectric gates BP-02 with measuring base 2 m, 5 – target model consisting with aluminum plates put together according with PBO-50 procedure, 6 – projectile stopper, 7 – projectile speed recorder, 8 – digital recorder RC-06 cooperating with pressure detector



Rys. 2. Model celu warstwowego (układ płyt): Płyta nr 1 – płyta aluminiowa \neq 4 EN AW- 2014 (EN-AW-AlCuSiMg) wg PN – EN 573-3:1998 (odpowiadają gat. PA-6 wg PN-79/H-88026), Płyty nr 2-5 – płyty aluminiowe \neq 2 EN AW- 2014 (EN-AW-AlCuSiMg) wg PN – EN 573-3:1998 (odpowiadają gat. PA-33 wg PN-79/H-88026)

Fig. 2. Model of multi-plate target (plate set): Plate nr 1 – aluminum plate \neq 4 EN AW- 2014 (EN-AW-AlCuSiMg) according to PN – EN 573-3:1998 (meet a standard PA-6 according to PN-79/H-88026), Plates nr 2-5 – aluminum plates \neq 2 EN AW- 2014 (EN-AW-AlCuSiMg) according to PN – EN 573-3:1998 (meet a standard PA-33 according to PN-79/H-88026)

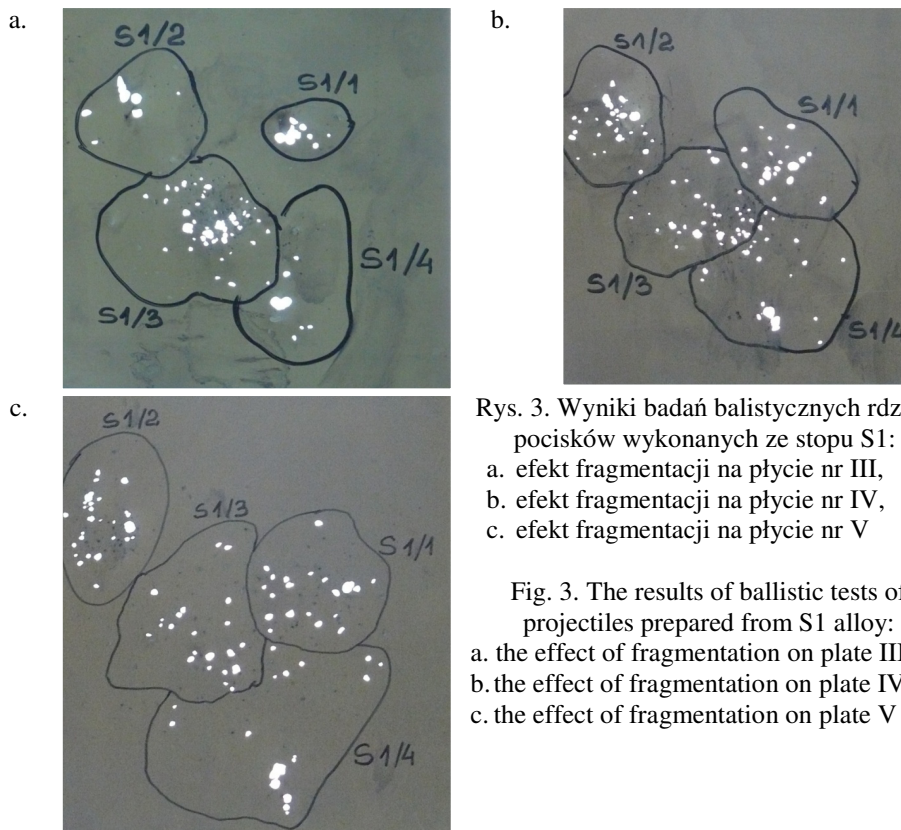
3. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 1 zamieszczono oznaczenie badanych stopów oraz parametry prób balistycznych, zaś wyniki badań w postaci zdjęć płyt świadków nr III, IV i V rejestrujących efekt rozcalania rdzeni zamieszczono na rysunkach 3-6.

Tabela 1. Oznaczenie stopów i parametry prób balistycznych

Table 1. Alloy description and ballistic test parameters

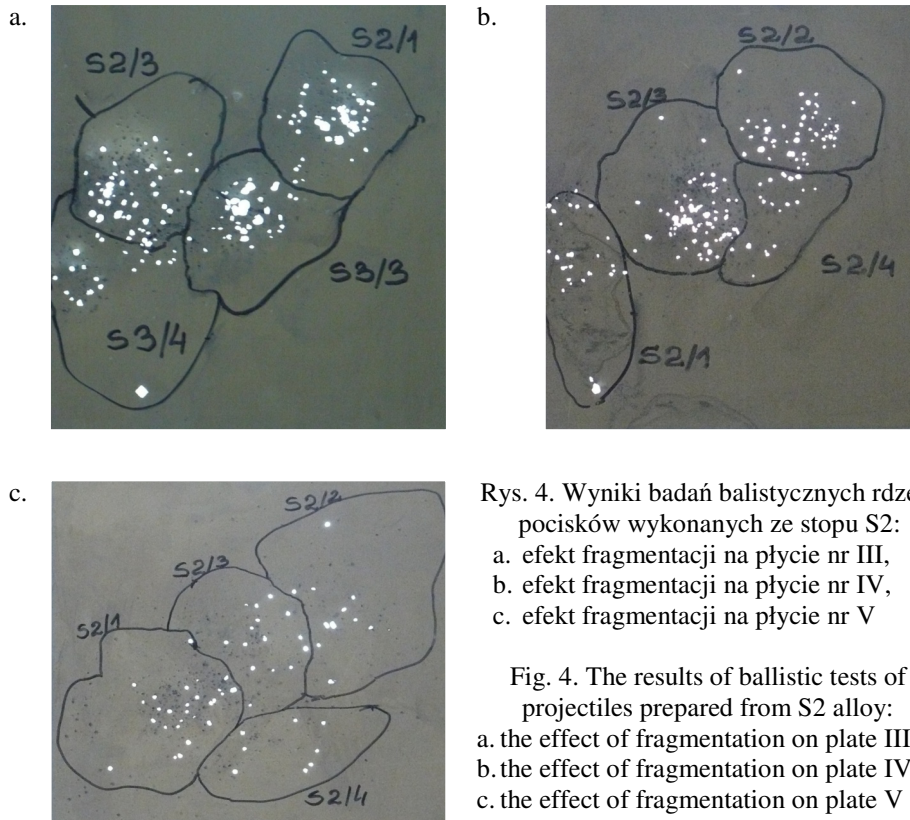
Oznaczenie stopu	Parametry balistyczne		
	Prędkość początkowa V_p [m/s]	Ciśnienie w komorze naboju p_k [MPa]	Energia kinetyczna E_k [J]
S1	973,7	368,9	3840,03
S2	997,8	381,3	4281,50
S3	973,6	376,3	3840,00
S4	972,1	374,7	3827,03



Rys. 3. Wyniki badań balistycznych rdzeni pocisków wykonanych ze stopu S1:
 a. efekt fragmentacji na płycie nr III,
 b. efekt fragmentacji na płycie nr IV,
 c. efekt fragmentacji na płycie nr V

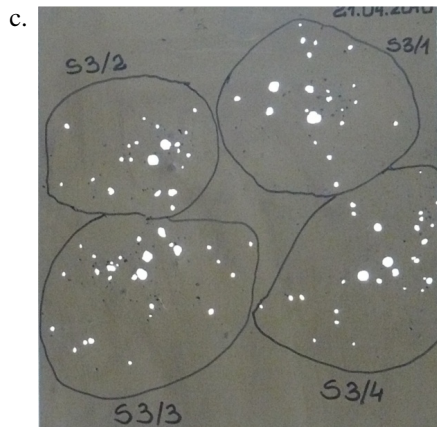
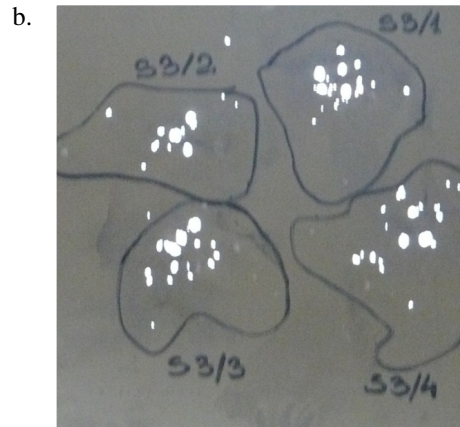
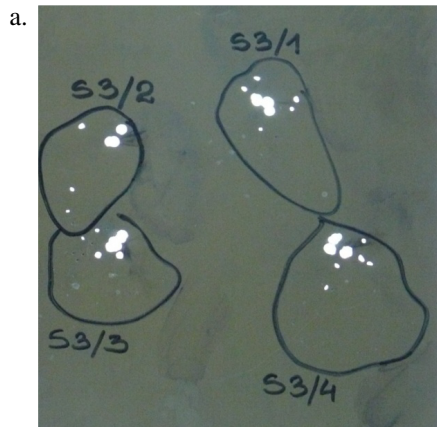
Fig. 3. The results of ballistic tests of projectiles prepared from S1 alloy:
 a. the effect of fragmentation on plate III
 b. the effect of fragmentation on plate IV,
 c. the effect of fragmentation on plate V

Symbole Sx/y widoczne na zdjęciach płyt oznaczają odpowiednio: $x = 1, 2, 3$ i 4 (numer stopu), zaś $y = 1, 2, 3$ i 4 – kolejny strzał. Ze zdjęć pokazanych na rysunkach 3-6 wynika, iż charakter fragmentacji rdzeni z WSC o odmiennym składzie chemicznym jest różny. Ze zdjęć widać, że fragmentacja rdzeni ze stopu S2 ma charakter gasnący (rys. 4), podczas gdy dla rdzeni ze stopu S3 efekt rozczalenia pocisku jest narastający (rys. 5). Z kolei rdzeń pocisku ze stopu S4 praktycznie nie wykazuje efektu fragmentacji (rys. 6). Choć ocena taka wydaje się jednoznaczna, to jednak byłoby pożądane, aby zachowanie się rdzeni w warunkach obciążeń uderowych opisać w sposób ilościowy. Jednym z celów niniejszej pracy było właśnie zaproponowanie kryterium umożliwiającego ocenę skłonności do fragmentacji w sposób ilościowy.



Rys. 4. Wyniki badań balistycznych rdzeni pocisków wykonanych ze stopu S2:
 a. efekt fragmentacji na płycie nr III,
 b. efekt fragmentacji na płycie nr IV,
 c. efekt fragmentacji na płycie nr V

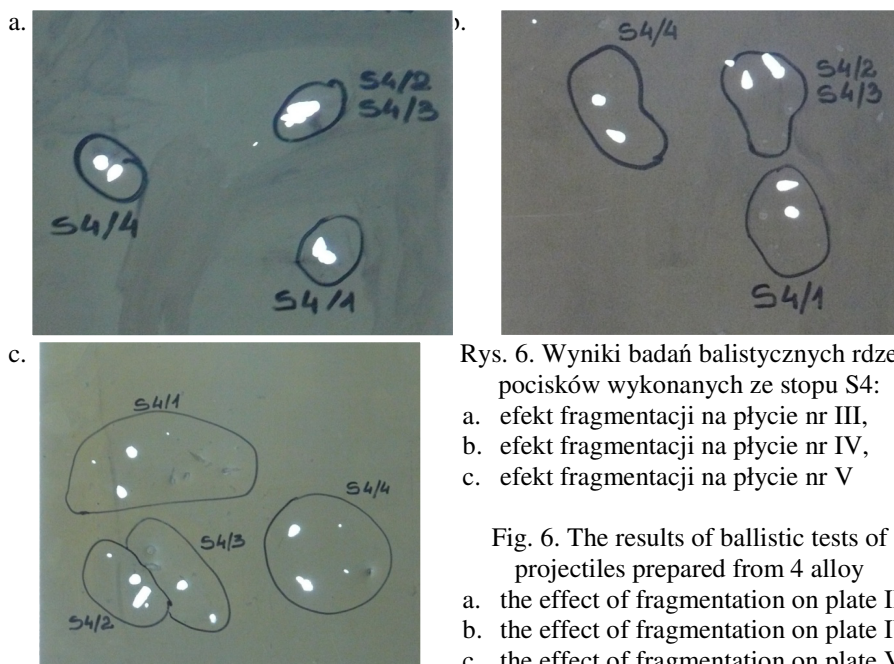
Fig. 4. The results of ballistic tests of projectiles prepared from S2 alloy:
 a. the effect of fragmentation on plate III,
 b. the effect of fragmentation on plate IV,
 c. the effect of fragmentation on plate V



Rys. 5. Wyniki badań balistycznych rdzeni pocisków wykonanych ze stopu S3:
a. efekt fragmentacji na płycie nr III,
b. efekt fragmentacji na płycie nr IV,
c. efekt fragmentacji na płycie nr V

Fig. 5. The results of ballistic tests of projectiles prepared from S3 alloy:
a. the effect of fragmentation on plate III,
b. the effect of fragmentation on plate IV
c. the effect of fragmentation on plate V

Na podstawie porównania zarejestrowanych parametrów balistycznych, jak również wyników z zakresu balistyki końcowej (tabela 1) stwierdzono, że badania przeprowadzono niemal w identycznych warunkach. Dowodzą tego zarówno minimalne różnice wartości ciśnienia maksymalnego p_k znajdujące się w zakresie od 369 do 381 MPa, jak i prędkość pocisku V_p , zawierająca się w przedziale od 972,1 do 997,8 m/s.



Rys. 6. Wyniki badań balistycznych rdzeni pocisków wykonanych ze stopu S4:

- efekt fragmentacji na płycie nr III,
- efekt fragmentacji na płycie nr IV,
- efekt fragmentacji na płycie nr V

Fig. 6. The results of ballistic tests of projectiles prepared from 4 alloy

- the effect of fragmentation on plate III,
- the effect of fragmentation on plate IV,
- the effect of fragmentation on plate V

Jedyna różnica dotyczy energii kinetycznej, która w przypadku pocisków wykonanych ze stopu oznaczonego jako S2 (4281,50 J) była nieco większa niż w przypadku pocisków wykonanych z pozostałych stopów, dla których mieściła się w przedziale od 3827 do 3840 J. Mimo to różnica ta nie wpłynęła znacząco na efekt fragmentacji opóźnionej.

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Analizując wyniki badań z zakresu balistyki końcowej, należy zauważyć, iż na pierwszych dwóch płytach aluminiowych występują pełne przebicia dowodzące, że pociski, których rdzenie wykonano z WSC badanych w pracy, przejawiają zdolność do penetracji płyt świadków. Zachowanie rdzeni pocisków, wykonanych ze stopów o odmiennym składzie chemicznym i/lub parametrach procesu technologicznego, na kolejnych płytach jest jednak odmienne, a różnice te można zawrzeć w postaci następujących stwierdzeń:

- fragmentacja rdzeni pocisków ze stopu S1 wykazuje charakter narastający (rys. 3),
- fragmentacja rdzeni pocisków ze stopu S2 wykazuje charakter gasnący, co objawia się bardzo dużą fragmentacją na III płycie i zanikaniem liczby odłamków na kolejnych płytach (rys. 4),

– fragmentacja rdzeni pocisków ze stopu S3 ma charakter narastający, podobnie jak w przypadku rdzeni ze stopu S1, z tą różnicą, że wielkość odłamków dla rdzenia ze stopu S3 jest nieco większa niż obserwowana dla rdzeni ze stopu S1,

– rdzenie pocisków ze stopu S4 nie wykazują podatności na fragmentację.

Spostrzeżenia przytoczone powyżej mają charakter jakościowy i choć są prawdziwe, to jednak trudno byłoby na ich podstawie ocenić skłonność do fragmentacji w sposób obiektywny. Stąd też w dalszej części opracowania podano sposób ilościowej oceny skłonności WSC do rozcalania (fragmentacji) w oparciu o zaproponowane kryterium oceny fragmentacji – KOF, które jest funkcją F zależną od parametrów: n , s , r_s , gdzie:

n – liczba przestrzelin w obszarze fragmentacji dla danej próbki badawczej na kolejnych płytach III, IV i V,

s – pole całkowite powierzchni przestrzelin dla danej próbki badawczej na kolejnej płycie,

r_s – skupienie przestrzelin dla danej próbki badawczej (stopu) na kolejnej płycie (średni promień rozrzutu).

Współczynnik skłonności do rozcalania na i -tej płycie opisano za pomocą równania:

$$KOF_{pt.i} = \frac{[(n_{pt.i}-1) \times s_{pt.i}]}{r_{spt.i}^2} \quad (1)$$

w którym indeks „i” oznacza kolejne płyty: III, IV oraz V.

Wartość średnia współczynnika efektywności fragmentacji KOF_{sr} jest średnią arytmetyczną współczynników cząstkowych obliczonych dla kolejnych płyt:

$$KOF_{sr} = \frac{KOF_{pt.III} + KOF_{pt.IV} + KOF_{pt.V}}{3} \quad (2)$$

gdzie: $KOF_{pt.III}$ – kryterium oceny fragmentacji dla danej próbki badawczej na płycie III,

$KOF_{pt.IV}$ – kryterium oceny fragmentacji dla danej próbki badawczej na płycie IV,

$KOF_{pt.V}$ – kryterium oceny fragmentacji dla danej próbki badawczej na płycie V.

Wartości parametrów „s” i „n” obliczono za pomocą stanowiska do pomiarów planimetrycznych, stereometrycznych oraz monitoringu i analizy kształtu na obrazach mikro- i makroskopowych z wykorzystaniem oprogramowania MultiscanBase v. 8.08.

Z kolei średni promień rozrzutu dla danej próbki badawczej na poszczególnych płytach oszacowano wg metodyki opisanej szczegółowo w pracy [10].

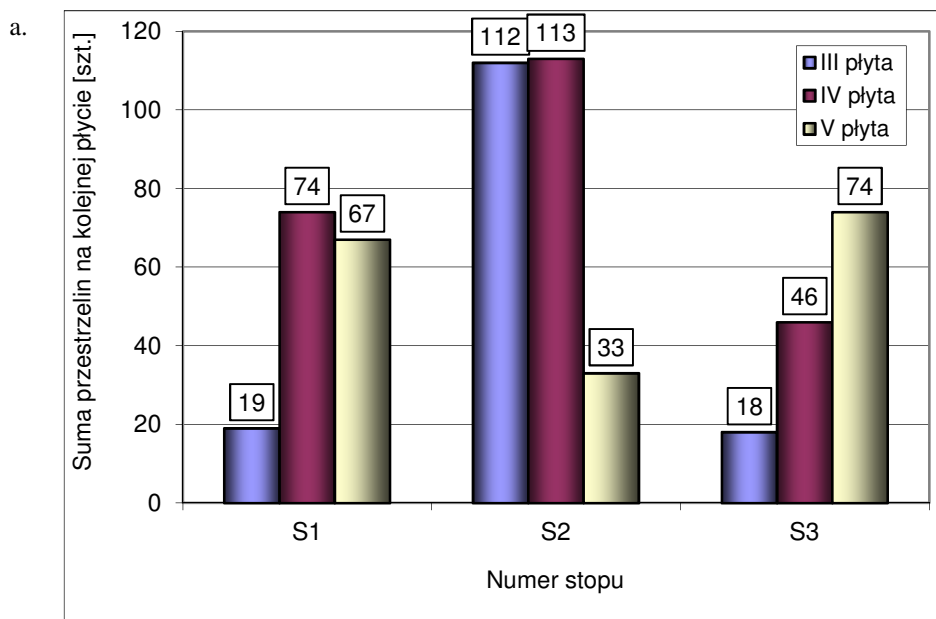
Wartości promienia rozrzutu – r_s oraz średniego promienia rozrzutu – r_s^{sr} dla pocisków wykonanych z badanych stopów zamieszczono w tabeli 2.

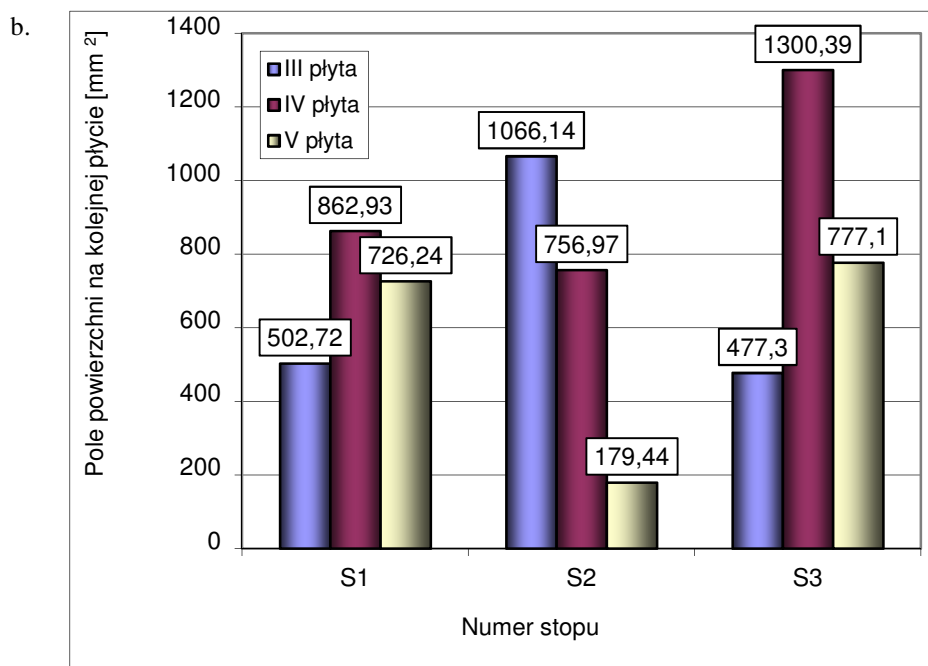
Tabela 2. Wyniki z obliczeń średniego promienia rozrzutu dla stopów S1, S2 i S3 na kolejnych płytach z wykorzystaniem pomiarów przeprowadzonych dla 3 strzałów

Table 2. The results of average scatter radius calculation for S1, S2 and S3 alloys on successive plates performed using measurements performed for 3 shoots

Rodzaj próbki	r_s [mm]									r_s^{sr} [mm]		
	płyta III			płyta IV			płyta V			płyta III	płyta IV	Płyta V
S1	18,3	23,7	27,5	26,8	32,1	33,9	26,9	25	35,2	23,17	30,93	29,03
	S1/1	S1/2	S1/4	S1/1	S1/2	S1/3	S1/1	S1/2	S1/3			
S2	22,9	30	28,8	32	31,5	37,8	18,8	29,9	27,8	27,23	33,77	25,50
	S2/2	S2/3	S2/4	S2/2	S2/3	S2/4	S2/2	S2/3	S2/4			
S3	15,6	13,3	19,7	18,6	22,5	25,2	32,9	41,5	40,9	16,20	22,10	38,43
	S3/1	S3/3	S3/4	S3/1	S3/3	S3/4	S3/1	S3/3	S3/4			

Wyniki pomiarów sumarycznej liczby przestrzelin oraz sumarycznej powierzchni przestrzelin na płytach: III, IV i V otrzymanych podczas badań balistycznych pocisków wykonanych ze stopów S1, S2 oraz S3 zamieszczono odpowiednio na rysunkach 7a i 7b.





Rys. 7. Wyniki badań balistycznych stopów S1, S2 i S3: a – suma liczby przestrzelin na kolejnych płytach, b – suma powierzchni przestrzelin na poszczególnych płytach

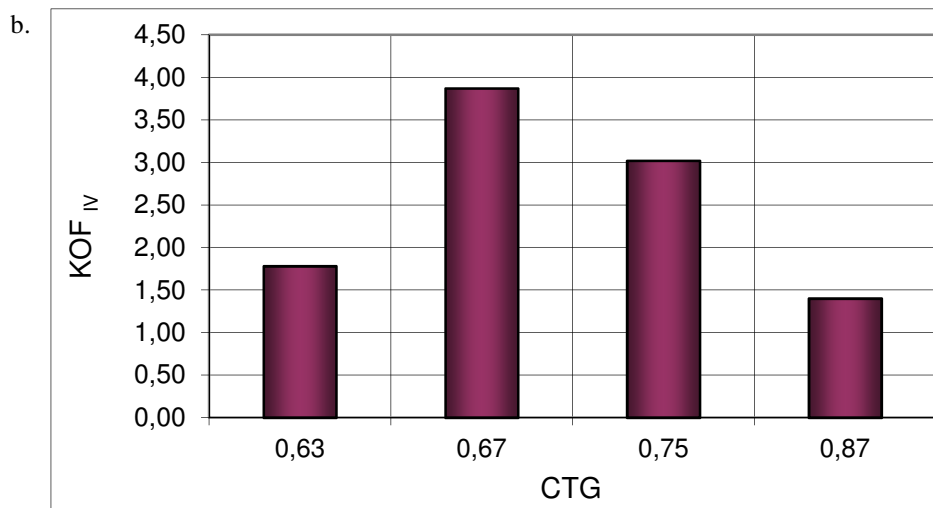
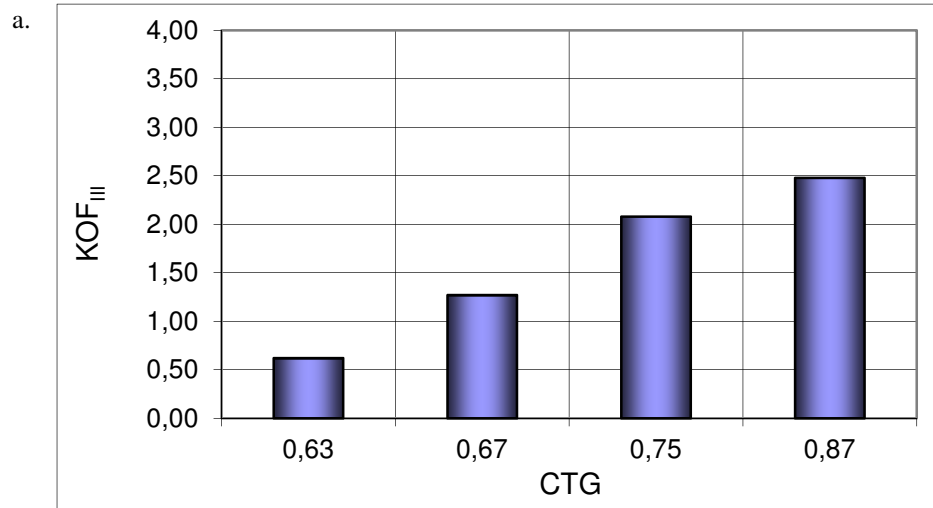
Fig. 7. The results of ballistic experiment of S1, S2 and S3 alloys: a – the sum of perforations number on successive plates, b – the sum of perforations area on successive plates

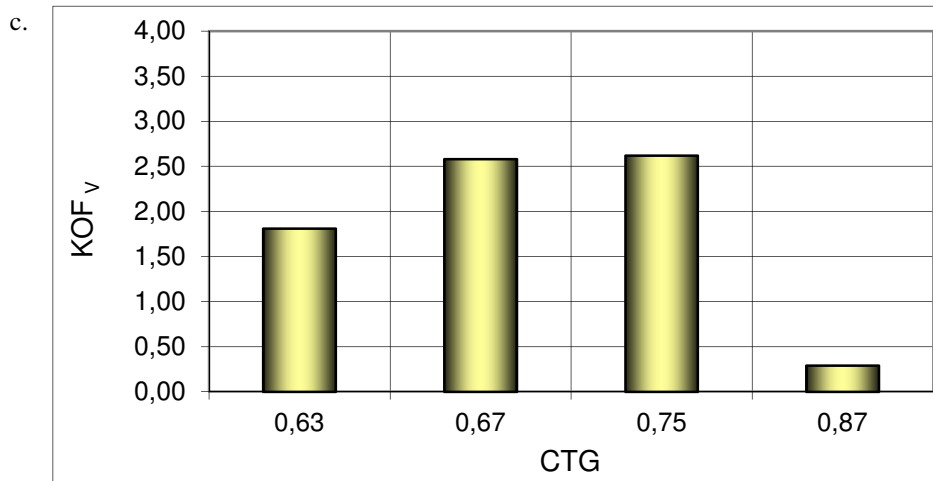
Wyniki pomiarów parametrów: n , s oraz r_s umożliwiły obliczenie KOF_i oraz KOF_{sr} , w funkcji tzw. parametru spójności – CTG (ang. *contiguity*), opisującego stosunek powierzchni bezpośredniego styku ziaren wolframu w stosunku do całkowitej powierzchni granic, zarówno ziaren (wolfram-wolfram), jak i międzyfazowych (wolfram-osnowa). Ilustrację graficzną zależności wartości KOF_i od parametru CTG dla kolejnych płyt zamieszczono na rysunku 8, zaś wartości średniej – KOF_{sr} – na rysunku 9.

Tabela 3. Wartości kryterium oceny fragmentacji dla poszczególnych próbek badawczych

Table 3. The values of fragmentation assessment criteria for specimens studied in the experiment

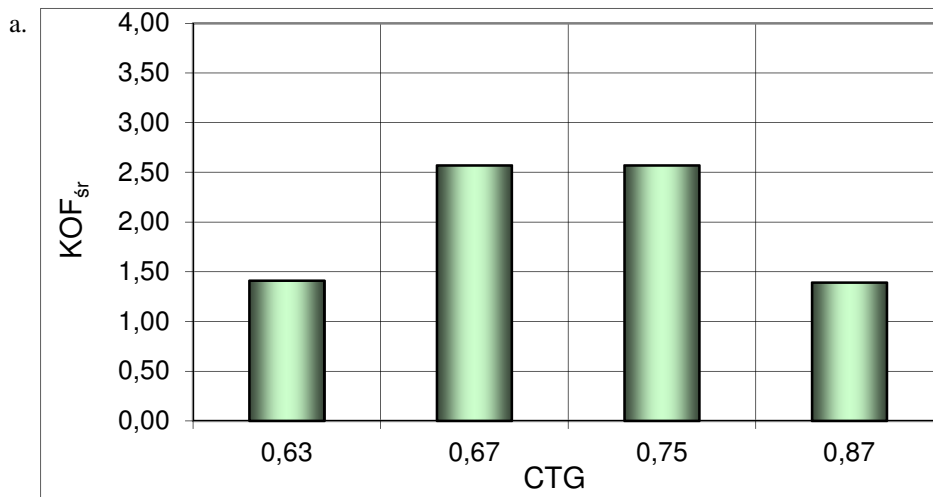
Rodzaj próbki	CTG	KOF_i			KOF_{sr}
		płyta III	płyta IV	płyta V	
S1	0,75	1,977	7,415	6,414	5,269
S2	0,87	17,889	8,336	1,012	9,079
S3	0,67	3,637	13,608	4,326	7,190





Rys. 8. Wartość współczynnika oceny fragmentacji KOF_i w funkcji parametru CTG dla płyty: a – III, b – IV i c – V

Fig. 8. The value of fragmentation assessment coefficient KOF_i as a function of CTG parameter for plates: a – III, b – IV and c – V



Rys. 9. Zależność wartości KOF_{SR} od parametru CTG

Fig. 9. The dependence of KOF_{SR} value on CTG parameter

Z wykresu (rys. 9) widać, że w przypadku badanych stopów wartość średnia uogólnionego kryterium oceny fragmentacji – KOF_{sr} osiąga maksimum dla parametru CTG w obszarze 0,65-0,7.

Jest to ważna informacja z punktu widzenia projektowania materiałów o szczególnych właściwościach użytkowych. Wynika z niej, że duża wartość parametru CTG, jakkolwiek zapewnia jeszcze wytrzymałość wystarczającą do zachowania rdzenia w całości po odpaleniu, powoduje bardzo intensywną fragmentację, która niekiedy może okazać się niepożądana. Może natomiast być wskazana w innych okolicznościach, np. w przypadku odmiennych obiektów czy w celach treningowych.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analizując rezultaty prób balistycznych, można stwierdzić, iż zjawisko FRANGIBLE przybierało różne formy. Fragmentacja WSC ma odmienny charakter: narastający lub gasnący, a niekiedy była wręcz niewystarczająca (S4). Najwcześniejszą inicjację zjawiska rozcalania stwierdzono dla stopu S2, w przypadku którego na płytach nr III i IV zarejestrowano największą całkowitą liczbę przestrzelin (112 i 113), a suma powierzchni tych przestrzelin wynosiła odpowiednio 1066,14 oraz 756,97 mm². Dla pozostałych stopów stwierdzono fragmentację narastającą. Potwierdzają to otrzymane wartości obliczeń średniego promienia rozrzutu, które dla płyt III i IV zmieniały się odpowiednio w przedziałach: 16,20÷27,23 oraz 22,10÷33,77. Największe wartości uzyskano w przypadku fragmentacji stopu S2, podczas gdy dla stopu S3 były one znacznie mniejsze.

Wyniki obliczeń wartości KOF dowodzą, że najwyższą skłonność do fragmentacji przejawiały w kolejności WSC, oznaczone jako: S2, S3 a najmniejszą S1. Pogłębienie wiedzy na temat materiałów podatnych na występowanie zjawiska FRANGIBLE wymaga jednak dalszych badań ukierunkowanych np. na procentowe zróżnicowanie materiałów wejściowych, czy stopniową zmianę parametrów spiekania. Konieczne jest również szczegółowe sprawdzenie właściwości dynamicznych i balistycznych pod kątem oceny zdolności penetrujących WSC skłonnych do fragmentacji. Szczególnie ten ostatni rodzaj badań może okazać się wielce użyteczny z punktu widzenia uzyskania przez inżyniera jednoznacznej informacji na temat możliwości zastosowania określonego materiału w przemyśle obronnym na penetratory pocisków FAPDS.

Na podstawie wyników badań oraz zamieszczonej wyżej ich analizy autorzy zaproponowali następujące wnioski:

1. Wyniki badań balistycznych umożliwiają jakościową ocenę skłonności WSC do fragmentacji.
2. Efekt fragmentacji rdzeni pocisków podkalibrowych wykonanych z poszczególnych WSC ma charakter zróżnicowany i zależy od składu chemicznego stopów oraz metody ich wytwarzania.
3. Kryterium KOF umożliwia ilościową wiarygodną ocenę skłonności materiałów do fragmentacji.

4. Ocena ilościowa WSC skłonnych do fragmentacji potwierdza, iż zjawisko FRANGIBLE może przybierać różne formy – od narastającej do gasnącej.
5. Dla oceny danego WSC skłonnego do fragmentacji pod kątem jego przydatności do zastosowań militarnych konieczne jest przeprowadzenie prób balistycznych umożliwiających weryfikację właściwości penetrujących danego materiału.

LITERATURA

- [1] Majewski S., *Budowa amunicji. Tom I*, WAT, Warszawa, 1983.
- [2] Tretiakow G.M., *Amunicja artyleryjska*, Wyd. MON, Warszawa, 1954.
- [3] Kupidura P., Szymański J., Woźniak R., Podkalibrowa amunicja przeciwpancerna do armat czołgowych, cz. I i II, *WPTiL*, 2-3, 98, s. 8-11 i 9-12, 1998.
- [4] Bose A., German G., German R.M., Rhenium alloying of tungsten heavy alloys, *Powder Metallurgy International*, vol. 21, no. 3, pp. 9-13, 1989.
- [5] Włodarczyk E., Michałowski J., Piętaszewski J., Możliwości podwyższenia fizycznych właściwości rdzeni pocisków wytworzonych z metali ciężkich wzbogaconych renem, *Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej*, Waplewo, 2002.
- [6] Kaczorowski M., Nowak W., Rafalski M., Struktura i właściwości kompozytów wolframowych o osnowie W – Ni – Co, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria Mechanika*, zeszyt 66, s. 101-112, 2006.
- [7] Kaczorowski M., Skoczylas P., Ludyński Z., Rafalski M., Nowak W., The structure and properties of tungsten heavy alloys for special application, vol. 1, Refractory metals, *Proceedings of International Conference on High Performance P/M Materials*, May 25-29, 2009, RM68, Reutte, Austria, 2009.
- [8] Konieczny M., Kaczorowski M., Nowak W., Badania właściwości fizycznych i mechanicznych wolframowych stopów ciężkich skłonnych do fragmentacji wykonanych z różnie przygotowanych mieszanek, *Rudy i Metale Nieżelazne*, vol. 57, nr 7, s. 469-472, 2012.
- [9] Konieczny M., Kaczorowski M., Badania strukturalne wolframowych stopów ciężkich skłonnych do fragmentacji wykonanych z różnie przygotowanych mieszanek, *Rudy i Metale Nieżelazne*, vol. 57, nr 8, s. 444-451, 2012.
- [10] Konieczny M., *Badania wpływu składu chemicznego, parametrów technologicznych i mikrostruktury na skłonność wolframowych stopów ciężkich do fragmentacji*, praca doktorska, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2012.

- [11] Procedura PBO-50 sprawdzania własności rozpryskowych spieku wolframu do wykonania części przedniej rdzenia pocisku FAPDS-T, WIP, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2009.

Ballistic Tests of Susceptibility to Fragmentation of Tungsten Heavy Alloys Made from Differently Prepared Mixtures

Marcin KONIECZNY, Mieczysław KACZOROWSKI,
Leszek CYBULA

Abstract. The paper describes the results of ballistic tests of tungsten heavy alloys (WSC) susceptible to fragmentation. The materials being studied were the samples in the form of cal. 7.62×54 mm „Mosin” of heavy alloys projectiles prepared from the mixtures of powders W, Ni, Fe, and Co with the addition of ceramics. WSC's were obtained from the compacts which were liquid phase or solid sintered in the hydrogen atmosphere. Final ballistics tests were conducted in accordance with the research procedure PBO-50. The results obtained allow for the graphic evaluation of WSC susceptibility to fragmentation. On the basis of analysis of the results obtained during ballistic experiment, the qualitative criterion of frangible WSC to fragmentation was proposed.

Keywords: mechanics, tungsten heavy alloys, fragmentation, ballistic tests