



Koncepcja technologii spiekanych wkładek metalicznych do ładunków EFP

Bogdan ZYGMUNT^{1*}, Zenon WILK², Piotr KOŚLIK²

¹ Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

² Instytut Przemysłu Organicznego, Oddział w Krupskim Młynie,
ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn

* autor korespondencyjny, e-mail: Bogdan.Zygmunt@wat.edu.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 07.11.2012. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 10.04.2014

Streszczenie. Badania strumieni kumulacyjnych powstających z metalicznych wkładek proszkowych, przeprowadzone z wykorzystaniem impulsowej techniki rentgenowskiej, ujawniły ich wysoką przebijałość oraz zdolność do stabilnego lotu przy zachowaniu ciągłości, znacznie dłużej trwającej w porównaniu ze strumieniami kumulacyjnymi z litego metalu. Ujawnione specyficzne zachowanie regularności i stabilności strumieni kumulacyjnych z wkładek proszkowych skłoniło autorów do wykorzystania tej cechy proszkowych wkładek do konstrukcji innego rodzaju amunicji przebijającej – pocisków formowanych wybuchowo (EFP). W ładunkach kumulacyjnych typu EFP wkładka kumulacyjna ma kształt wycinka powierzchni kuli (sfera) lub stożka o kącie wierzchołkowym większym od 120°. Podobnie jak zweryfikowano utarty pogląd o konieczności wykonywania stożkowych wkładek kumulacyjnych z litego metalu, również wkładki sferyczne wykonane technologią metalurgii proszków mogą okazać się pełnowartościowym zamiennikiem skomplikowanych technologicznie litych wkładek sferycznych wytwarzanych z trudno dostępnych i drogich materiałów.

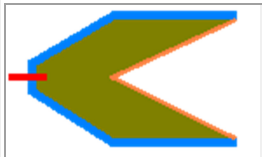

W pracy przedstawiono różnice w działaniu przebijającym obu rodzajów amunicji oraz opracowano koncepcję technologii proszkowych wkładek do ładunków EFP i wykonano partie modelowe różnych typów wkładek o średnicy do 45 mm.

Słowa kluczowe: ładunki kumulacyjne, metalurgia proszków, spiekane wkładki

1. PORÓWNANIE ŁADUNKÓW KUMULACYJNYCH KLASYCZNYCH I EFP

Kluczowym elementem ładunków kumulacyjnych, zarówno klasycznych, jak i EFP, decydującym o efektywności militarnej (zdolności przebicia pancerza), jest wkładka kumulacyjna. W ładunkach kumulacyjnych typu EFP wkładka kumulacyjna ma zwykle kształt wycinka powierzchni kuli o wysokości mniejszej od połowy promienia lub kształt zbliżony do stożka o kącie wierzchołkowym większym od 120° . Wkładka kumulacyjna do ładunków EFP jest projektowana łącznie z ładunkiem materiału wybuchowego w taki sposób, aby cała masa wkładki uformowana w pocisk posiadała maksymalną prędkość, a więc również energię kinetyczną [1-4].

Z uwagi na odmienną konstrukcję ładunków EFP i klasycznych ładunków kumulacyjnych z wkładką stożkową, zdecydowanie różne są kształty otworów wydrążonych przez te ładunki w przeszkodach, zwłaszcza w grubych płytach metalowych. Klasyczny strumień kumulacyjny draży w płycie pancernej wąski otwór o głębokości do 10 kalibrów ładunku, podczas gdy ładunek EFP wybija w płycie pancernej otwór o głębokości do 0,8 kalibra ładunku i średnicy do jednego kalibra. Istotny wpływ na skuteczność działania ładunku EFP, oprócz prędkości uformowanego pocisku, ma wysoka gęstość materiału wkładki, przy zachowaniu cechy jej dobrej plastyczności w warunkach naddźwiękowych dynamicznych oddziaływań z przeszkodą. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie budowę klasycznego ładunku kumulacyjnego i ładunku EFP oraz porównano ich podstawowe cechy użytkowe.

	<p>Zasięg rażenia od miejsca wybuchu – do 1 metra Głębokość przebicia pancerza – 3-10 kalibrów</p>
	<p>Zasięg rażenia od miejsca wybuchu – do kilkuset metrów Głębokość przebicia pancerza – 0,4-0,8 kalibra</p>

Rys. 1. Budowa klasycznego ładunku kumulacyjnego (na górze) i ładunku EFP (na dole) oraz porównanie ich podstawowych cech użytkowych [4]

Fig. 1. Construction of a shaped jet charge (top) and EFP charge (bottom) and comparison of their basic parameters

Podstawową różnicą wynikającą z konstrukcji obu rodzajów ładunków kumulacyjnych jest to, że metalowe wkładki napędzone energią produktów detonacji ulegają deformacji w odmienny sposób. Napędzona do prędkości 1-2,5 km/s cała wkładka sferyczna formuje się w pocisk monolityczny na odległości od kilku decymetrów do kilku metrów (zależnie od kalibru) i porusza się w takiej postaci na odległość kilkuset metrów, tracąc powoli prędkość (energię) w powietrzu. Stożkowa wkładka kumulacyjna (klasyczna) w trakcie detonacji ładunku jest zgniatana symetrycznie i z jej wewnętrznych warstw generowany jest strumień kumulacyjny o średnicy do kilku milimetrów, którego czoło porusza się z prędkością dochodzącą do 8-10 km/s, podczas gdy zgnieciona wkładka (tzw. zbitka kumulacyjna) podąża w tym samym kierunku z prędkością ok. 1 km/s. Ze względu na monotoniczny spadek prędkości elementów strumienia poczynając od jego czoła, strumień kumulacyjny ulega wydłużaniu w trakcie swobodnego lotu w powietrzu, aż do przerwania ciągłości i rozpadu na drobne fragmenty, które nie mają zdolności do penetracji twardych przegród.

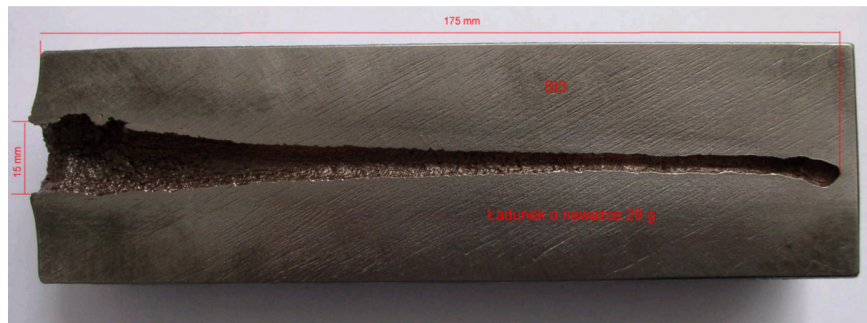
Na rysunku 2 przedstawiono efekt przebicia płyty pancernej o grubości 40 mm przez pocisk powstały z ładunku EFP z wkładką o średnicy 100 mm wykonaną z żelaza *armco* [1].



Rys. 2. Widok otworu w płycie RHA grubości 40 mm przebitej pociskiem EFP [1]

Fig. 2. View of a hole in a 40 mm thick RHA armour made by 100 mm EFP charge [1]

Na rysunku 3 przedstawiono efekt przebicia bloku stalowego na głębokość 170 mm przez niewielki ładunek kumulacyjny ze spiekaną w niskiej temperaturze wkładką stożkową, wykonaną z mieszaniny proszków miedzi i wolframu [2]. Masa wkładki i masa materiału wybuchowego były porównywalne i nie przekraczały 30 g.



Rys. 3. Przekrój kanału perforacyjnego wydrążonego w bloku stalowym przez klasyczny ładunek kumulacyjny z wkładką proszkową [2]

Fig. 3. The cross-section of a steel block perforated by a 40 mm shaped jet charge with a sintered conical copper liner [2]

W ostatnich latach ładunki kumulacyjne EFP dużych kalibrów okazały się wyjątkowo groźnym narzędziem zniszczenia w rękach terrorystów. Początkowo w Iraku, a później w Afganistanie, terroryści zaadaptowali konstrukcję ładunków EFP do walki z lekko opancerzonymi pojazdami bojowymi sił koalicyjnych, stosując taktykę tzw. *Explosively Formed Projectile Side Road Improvised Explosive Devices – EFP SRIED*. Wkładkę metalową o kształcie płaskiego stożka i masie wynoszącej do 5 kg produkuje się w prymitywnych warsztatowych odlewniach. Ładunek wybuchowy o masie do kilkunastu kilogramów montuje się metodą zalewania mieszaniną trotylu z heksogenem, pochodzącym z odzysku z głowic bomb lub pocisków artyleryjskich.



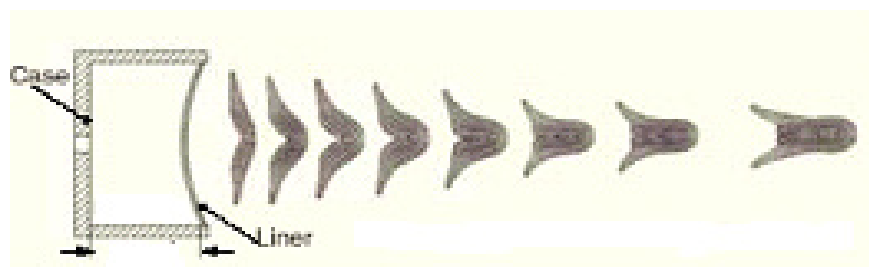
Rys. 4. Ustawianie miny przydrożnej typu EFP na trasie przejazdu pojazdów wojskowych [4]

Fig. 4. Installation of a big EFP charge on a route of military convoys [4]

Odpalenie zamaskowanej przy drodze wybuchowej pułapki odbywa się zdalnie (przewodowo lub radiowo, ewentualnie telefonem komórkowym) w momencie znalezienia się kolumny pojazdów wojskowych w strefie rażenia. Trafiony ciężkim pociskiem pojazd ulega zwykle całkowitemu zniszczeniu, a załoga ma niewielkie szanse na przeżycie. Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie ustawiania przez terrorystów miny-pułapki przy drodze, po której poruszają się pojazdy sił koalicyjnych.

2. BUDOWA I DZIAŁANIE ŁADUNKÓW EFP

Zastąpienie w ładunku kumulacyjnym ostrokątnej wkładki metalowej wkładką o kącie rozwartym lub wkładką o kształcie wycinka sfery lub wręcz płaską płytą (kąt rozwarcia 180°) spowoduje tworzenie się w trakcie detonacji z całej masy wkładki pocisku o prędkości od 1 do 2,5 km/s. Na rysunku 5 przedstawiono schematycznie proces dynamicznego formowania się pocisku z wkładki sferycznej [4].



Rys. 5. Fazy tworzenia się pocisku EFP z ładunku z wkładką sferyczną [4]

Fig. 5. Phases of explosive forming of projectile from spherical lines [4]

Na rysunku 6 przedstawiono odzyskany po wybuchu ładunku w dobrym stanie pocisk EFP uformowany ze sferycznej wkładki miedzianej o średnicy czaszy 150 mm [4]. Masa pocisku wynosi ok. 1,5 kg.



Rys. 6. Pocisk EFP uformowany ze sferycznej wkładki, odzyskany po wybuchu ładunku [4]

Fig. 6. Explosive forming projectile recovered after detonation of EFP charge [4]

Idea wykorzystania energii materiału wybuchowego do ukształtowania ciężkiej metalowej wkładki ładunku w penetrator o aerodynamicznych kształtach i jednoczesnego napędzenia go do prędkości hiperdźwiękowej w ściśle określonym kierunku jest w istocie zrealizowaniem zadania artyleryjskiego bez użycia lufy balistycznej dużego kalibru. Ładunek wybuchowy typu EFP składa się zasadniczo z materiału wybuchowego, sferycznej wkładki metalowej, obudowy oraz układu inicjującego (rys. 4). Często ładunki EFP są mocowane na podstawach (trójnóg) lub innych elementach konstrukcyjnych w celu łatwego kierowania pocisku w wyznaczonym kierunku. Detonacja materiału wybuchowego jest inicjowana od przeciwległej strony wkładki kumulacyjnej, co powoduje, że fala detonacyjna o bardzo wysokim ciśnieniu i prędkości rzędu 8 km/s uderza symetrycznie w ściankę wkładki, napędzając ją do prędkości dochodzącej do 2,5 km/s. Ponieważ wzdłuż promienia wkładki występuje pewien gradient prędkości, napędzona wkładka sferyczna ulega w początkowej fazie lotu dalszej deformacji do postaci wydłużonego pocisku z charakterystycznymi stabilizatorami, utworzonymi z obrzeża wkładki (rys. 6). Tak ukształtowany aerodynamiczny pocisk nie traci zbyt szybko prędkości i nawet na odległości kilkuset metrów może wykonać pracę mechaniczną, niszcząc uderzoną przeszkodę (pancerz, obiekt budowlany, pojazd). W porównaniu z klasycznym ładunkiem kumulacyjnym, głębokość przebiccia przegrody jest znacznie mniejsza, jednakże wielokrotnie zwiększa się średnica otworu (rys. 2).

Energia kinetyczna, jaką dysponują pociski EFP, może sięgać wartości do 10 MJ, przy czym uderzenie w przeszkodę praktycznie powoduje przekazanie całej energii kinetycznej pocisku do struktury przeszkody na powierzchni uderzenia, co powoduje powstanie skrajnie wysokich ciśnień i naprężeń niszczących, propagujących się w głąb przeszkody. Jeżeli przeszkoda nie jest w stanie zaabsorbować całej energii pocisku, następuje dalszy jego lot i niszczenie kolejnych napotkanych przeszkód. Przed ładunkami EFP nie można ustawić praktycznie żadnych skutecznych osłon, tak jak to można uczynić wobec klasycznych ładunków kumulacyjnych, gdzie zakłócenie tzw. odległości optymalnej (ogniskowej) wybuchu ładunku od pancierza zdecydowanie zmniejsza efektywność działania.

Z tych względów szczególnie niebezpieczne są ataki improwizowanymi ładunkami EFP na pojazdy w konwojach wojskowych, mające miejsce w działaniach zbrojnych w Iraku i Afganistanie. Lekko opancerzone oraz nieopancerzone transportowe pojazdy są bezbronne wobec improwizowanych ładunków EFP.

3. TECHNOLOGIA WYKONANIA SFERYCZNEJ WKŁADKI KUMULACYJNEJ

Technologia wykonywania wkładek sferycznych do ładunków EFP w skali przemysłowej jest w Polsce nierozwiązana. W próbach opracowania technologii wkładek sferycznych stosowano dotychczas krążki z miedzi elektrolitycznej lub miękkiego żelaza – np. gatunku *armco*. Oba materiały charakteryzują się dobrą plastycznością dynamiczną, jednakże mają gęstość poniżej 9 g/cm^3 , podczas gdy najbardziej efektywne, obecnie stosowane w amunicji przeciwpancernej, są wkładki wykonywane z tantalu (gęstość $16,6 \text{ g/cm}^3$), który charakteryzuje się bardzo wysoką plastycznością, także w warunkach dynamicznych. Podstawowym warunkiem uzyskania efektywnych ładunków EFP jest wykonanie z plastycznego metalu sferycznej wkładki o wysokiej symetrii osiowej obejmującej zarówno kształt, jak i masę oraz jednorodność właściwości mechanicznych metalu (twardość, wytrzymałość, gęstość) w całej objętości wkładki. W tabeli 1 zestawiono podstawowe właściwości metali stosowanych do produkcji wkładek kumulacyjnych, zarówno klasycznych (ostrokątnych), jak i wkładek EFP (rozwartokątnych i sferycznych).

Tabela 1. Właściwości fizykomechaniczne metali stosowanych na wkładki kumulacyjne

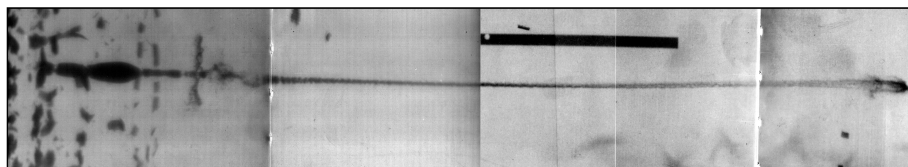
Table 1. Physical and mechanical properties of metals used for liners manufacturing

PARAMETR	Miedź	Nikiel	Żelazo (Armco)	Wolfram	Tantal	Uran	Molibden
Gęstość [g/cm^3]	8,92	8,9	7,87	19,3	16,6	19,05	10,22
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	210÷240	350÷550	200	1510	400	800	665
Wydłużenie [%]	38÷55	15÷40	30÷50	1÷60	20÷40	25	36
Prędkość dźwięku w materiale [m/s]	3940	4581	3574	4029	3414	2267	5124
Temperatura topnienia [$^{\circ}\text{C}$]	1083	1453	1535	3410	2996	1132	2610
Cena [USD/t]	1428	4315	485	8750	85800	–	11250

Technologia metalurgii proszków stwarza możliwości projektowania wkładek jednolitych oraz warstwowych, a także złożonych z mieszaniny proszków różnych metali. Istotą koncepcji jest zastosowanie w warunkach półprzemysłowych technologii metalurgii proszków dla otrzymywania wkładek sferycznych o gęstości zbliżonej do gęstości tantalu.

Do wykonania wkładek zastosowano technikę matrycowego prasowania mieszaniny proszków metali z udziałem składnika o wysokiej gęstości (wolfram), a następnie operacje spiekania i kalibracji kształtu.

Autorzy opracowali i wdrożyli do produkcji kilkanaście typów małogabarytowych ładunków kumulacyjnych zastosowanych w poszukiwaniach ropy i gazu oraz dla techniki wojskowej (amunicja kasetowa odłamkowo-kumulacyjna) [5-19]. W kolejnych patentach autorzy zastrzeżili technologię wykonywania wkładki kumulacyjnej techniką metalurgii proszków [20], sposób flegmatyzacji krystalicznych materiałów wybuchowych emulsją fluoropolimerową w celu uzyskiwania ładunków o wysokiej gęstości [21] oraz metodę otrzymywania precyzyjnych proszkowych wkładek kumulacyjnych (również wkładek wielowarstwowych) o gęstości powyżej 12 g/cm^3 , z dodatkiem proszku wolframu [22]. Kluczową innowacją w wytwarzaniu wkładek proszkowych było zastosowanie metody matrycowego prasowania odpowiednio przygotowanej mieszaniny proszków metali, a następnie ich niskotemperaturowego spiekania w atmosferze ochronnej. Przeprowadzone badania metalograficzne wkładek proszkowych wykazały ich porowatą i niejednorodną strukturę odwzorowującą wyjściową mieszaninę proszków. Wykonane testy przebijalności metalowej tarczy przez ładunki kumulacyjne z wkładkami proszkowymi wykazały ich wysoką skuteczność porównywalną z tradycyjnymi ładunkami z wkładkami z litego metalu. Badania strumieni kumulacyjnych utworzonych z wkładek proszkowych, przeprowadzone z wykorzystaniem impulsowej techniki rentgenowskiej, ujawniły niezwykłą ich zdolność do stabilnego zachowania się na torze lotu przy zachowaniu ciągłości, znacznie dłużej trwającej w porównaniu ze strumieniami kumulacyjnymi pochodzącymi z wkładek z litego metalu. Na zdjęciu (rys. 7) przedstawiono strumień kumulacyjny utworzony z wkładki proszkowej (Cu + W) w momencie 70 mikrosekund od inicjacji ładunku [17, 19].



Rys. 7. Zdjęcie rentgenowskie strumienia kumulacyjnego wytworzonego przez ładunek kumulacyjny z wkładką proszkową po czasie 70 mikrosekund od momentu detonacji ładunku

Fig. 7. RTG flash photograph of a jet generated by a shaped charge with powder liner

Ujawnione specyficzne zachowanie regularności i stabilności strumieni kumulacyjnych z wkładek proszkowych skłoniło autorów do wykorzystania tej cechy proszkowych wkładek do konstrukcji innego rodzaju amunicji przebijającej – pocisków formowanych wybuchowo.

Kluczowym elementem ładunków kumulacyjnych, zarówno klasycznych, jak i typu EFP, decydującym o efektywności bojowej (przebijalności pancerza) jest wkładka kumulacyjna. Optymalizacja konstrukcji wkładki kumulacyjnej dotyczy jej kształtu, wymiarów geometrycznych, masy, rodzaju metalu, jego struktury metalograficznej oraz wysokiej osiowej symetrii, a także sposobu scalenia z ładunkiem materiału wybuchowego. Technologia wykonywania wkładek sferycznych do ładunków EFP w skali przemysłowej jest w Polsce nierozwiązana. W próbach opracowania technologii wkładek sferycznych w skali jednostkowej wykorzystano jako surowiec wyjściowy krążki z miedzi [3] lub blachę żelaza *armco* o grubości 5 mm [1]. Oba materiały charakteryzują się dobrą plastycznością dynamiczną, jednakże mają gęstość poniżej 9 g/cm^3 , podczas gdy najbardziej efektywne są wkładki wykonane z tantalu o gęstości 16 g/cm^3 .

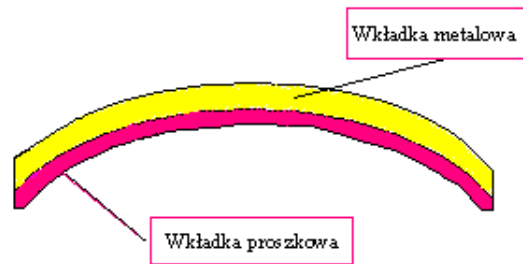
4. WKŁADKI SFERYCZNE WYKONANE TECHNOLOGIĄ METALURGII PROSZKÓW

Sferyczna wkładka kumulacyjna do ładunków EFP jest projektowana łącznie z ładunkiem materiału wybuchowego w taki sposób, aby cała masa wkładki uformowana w pocisk posiadała maksymalną prędkość, a więc również energię kinetyczną. Istotnym warunkiem jest również możliwie wysoka gęstość materiału wkładki, przy zachowaniu cechy jej dobrej dynamicznej plastyczności. Z literatury przedmiotu wynika, że najlepszym materiałem jest tantal (gęstość 16 g/cm^3). Jest to jednak rozwiązanie kosztowne i stosowane w wypadkach szczególnych. Powszechnie stosowana na wkładki sferyczne jest miedź (gęstość $8,9 \text{ g/cm}^3$) wytwarzana w postaci beztlenowej o drobnej strukturze ziarna. Taka postać miedzi nie jest produkowana w Polsce. Autorzy zaproponowali sposób wytwarzania wkładek sferycznych o wysokiej gęstości (ok. 15 g/cm^3) charakteryzujących się pseudoplastycznością wynikającą z dyskretnej struktury proszkowej. Wysoką gęstość wkładek sferycznych uzyskano przez zastosowanie mieszaniny proszków miedzi i wolframu, przy czym udział masowy wolframu wyniósł ponad 50%.

Pseudoplastyczność dynamiczną proszkowych strumieni kumulacyjnych wytwarzanych z wkładek proszkowych wykonanych z mieszaniny proszków miedzi i wolframu autorzy wykazali dla przypadku klasycznych ładunków kumulacyjnych [14, 15, 17, 19]. Do wykonania wkładek sferycznych zastosowano technikę matrycowego prasowania mieszaniny proszków, a następnie operację spiekania niskotemperaturowego i końcowej kalibracji kształtu przez prasowanie wibracyjne na zimno [2, 18, 20, 22].

Autorzy wykonali i zbadali również zachowanie się wkładek sferycznych warstwowych, złożonych z warstwy monolitycznej (np. miedź) oraz warstwy proszkowej o wysokiej gęstości zawierającej jako główny składnik proszek wolframu.

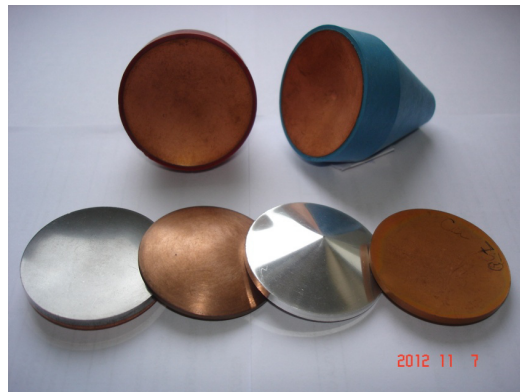
Na rysunku 8 przedstawiono schematycznie sferyczną wkładkę warstwową, gdzie warstwą przylegającą do materiału wybuchowego jest monolityczna miedź, a warstwa zewnętrzna jest spiekem metalicznych proszków o różnej gęstości.



Rys. 8. Warstwowa wkładka sferyczna wykonana z kompozytu proszkowo-metalowego

Fig. 8. Two-layer liner made of a metal sheet and a metal powder layer

Wykonane według opracowanej technologii wkładki sferyczne zostaną użyte do elaboracji ładunków EFP, stosując wysokoenergetyczny MW (flegmatyzowany różnymi substancjami heksogen lub oktogen). Istotnym technicznym czynnikiem decydującym o efektywności ładunków EFP jest sposób elaboracji i końcowego ich montażu. Wymagane jest precyzyjne wykonanie wkładki proszkowej EFP oraz elaborowanego materiału wybuchowego w osłonie ładunku metodą prasowania matrycowego.



Rys. 9. Wkładki sferyczne o średnicy 45 mm wykonane z proszków i ładunki EFP (na górze)

Fig. 9. Liners for EFP charges (bottom) and EFP charges for piercing tests (top)

Konieczna jest wysoka precyzja montowanych elementów i stosowanej techniki prasowania gwarantująca uzyskanie symetrii osiowej i promieniowej ładunków. Z tego względu podstawowym zagadnieniem w procesie technologicznym jest spełnienie wymagań jakościowych dla elementów ładunku i przy jego wykonaniu. Na zdjęciu (rys. 9) przedstawiono kilka różnych wkładek sferycznych wykonanych z proszków miedzi, wolframu, aluminium i ołowiu, zarówno jednolitych, jak i dwuwarstwowych.

5. PODSUMOWANIE

Technologia metalurgii proszków okazała się użytecznym narzędziem do wytworzenia wkładek sferycznych do ładunków EFP. W porównaniu z wytwarzaniem proszkowych wkładek stożkowych o ostrym kącie wierzchołkowym, jest to zadanie znacznie łatwiejsze. Autorzy wytworzyli różnorodne sferyczne wkładki proszkowe o gęstości do 15 g/cm^3 oraz wykonali z nich ładunki EFP o średnicy do 45 mm.

Przydatność otrzymanych sferycznych wkładek proszkowych zostanie oceniona w badaniach laboratoryjnych, gdzie będzie porównana ich skuteczność przebijałości stalowej płyty w porównaniu z działaniem pocisków EFP generowanych z wkładki wykonanej z litego metalu. Istotne będzie również zachowanie skuteczności pocisku EFP wytwarzanego z proszkowej wkładki na odległości kilkunastu metrów i większej, aż do utraty walorów bojowych.

Podstawowym problemem może okazać się utrzymanie spoiwości porowatego metalicznego materiału o mikroziarnistej strukturze w fazie dynamicznego formowania pocisku i w locie z prędkością hiperdźwiękową w powietrzu. Analogie z zachowaniem się pocisków uformowanych wybuchowo z litych wkładek sferycznych mogą być zastosowane, podobnie jak zostało to udowodnione przez autorów dla przypadku strumieni kumulacyjnych generowanych przez ładunki z wkładkami stożkowymi – proszkowymi i z litego materiału.

Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez NCBiR ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr O N501 216439.

LITERATURA

- [1] Borkowski J., *Konstrukcja i badania układu do wybuchowego formowania pocisków dla miny przeciwśmigłowej*, rozprawa doktorska, WAT, Wydział Mechatroniki, Warszawa, 2007.
- [2] Wilk Z., *Opracowanie konstrukcji i technologii ładunków kumulacyjnych do efektywnej perforacji w odwiertach geologicznych*, rozprawa doktorska, WAT, Wydział Mechatroniki, Warszawa, 2008.

- [3] Milewski E., *Eksperymentalno-teoretyczna optymalizacja ładunków do wybuchowego formowania pocisków*, rozprawa doktorska, WAT, Wydział Mechatroniki, Warszawa, 1997.
- [4] <http://privat.bahnhof.se/wb907234/efp.htm>
- [5] Kupidura Z., Wilk Z., Zygmunt B., Zastosowanie wysokoenergetycznych kompozycji materiałów wybuchowych z teflonem (PTFE) w dziedzinie kumulacji wybuchowej, *Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji*, nr 65, s. 61-69, 1998.
- [6] Wilk Z., Zygmunt B., Właściwości strzałowe materiałów wybuchowych flegmatyzowanych politetrafluoroetylenem, *Konferencja Naukowa IPO '98*, Warszawa, 6-8.10.1998.
- [7] Wilk Z., Zygmunt B., Właściwości użytkowe materiałów wybuchowych flegmatyzowanych politetrafluoroetylenem, *Organika – Prace Naukowe IPO*, s. 35-42, 1999.
- [8] Wilk Z., Zygmunt B., Ładunki kumulacyjne dla górnictwa naftowego, *Proceedings of II Seminar „New Trends in Researchs of Energetic Materials”*, Pardubice, Czech Republic, 14-15.04.1999, s. 79-89, 1999.
- [9] Wilk Z., Zygmunt B., Badania właściwości użytkowych heksogenu i oktogenu z dodatkiem fluoropolimerów, *Materiały III Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”*, Waplewo, 11-13.10.2000, wyd. CD ROM, stron 6, 2000.
- [10] Wilk Z., Zygmunt B., Reaserches of high energy explosives with fluoropolymer binders, *Proceedings of IV Seminar „New Trends in Researchs of Energetic Materials”*, Pardubice, Czech Republic, 11-12.04.2001, pp. 364-369, 2001.
- [11] Zygmunt B., Kostrow R., Milewski E., Wilk Z., Charges of high explosives with increased brisance, *ibid, Proceedings of the 29th Scientific Conference of Military Technical Academy*, Bucharest, Romania, 15-16.11.2001, wyd. CD-ROM, stron 7, 2001.
- [12] Kupidura Z., Wilk Z., Zygmunt B., Badania granatów kumulacyjno-odłamkowych kal. 38 mm z dodatkowym efektem zapalającym, *Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Badania i rozwój systemu BM-21 oraz nowoczesnej amunicji”*, Kołobrzeg, 17-18.04.2002, s. 195-206, 2002.
- [13] Jach K., Trębiński R., Wilk Z., Zygmunt B., Badania ładunków kumulacyjnych z wkładkami proszkowymi do perforacji odwiertów naftowych, *Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”*, Waplewo, 9-11.10. 2002, s. 272-280, 2002.
- [14] Wilk Z., Zygmunt B., Badania ładunków kumulacyjnych z ciężkimi wkładkami proszkowymi, *Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”*, Waplewo, 11-13.10.2006, s. 1053-1063, 2006.

- [15] Wilk Z., Zygmunt B., Zastosowanie ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych, *Materiały Konferencji GIG „Bezpieczeństwo robót strzałowych w górnictwie”*, Ustroń, 4-6.10.2006, s. 221-237, 2006.
- [16] Wilk Z., Zygmunt B., Zastosowanie ładunków kumulacyjnych do perforacji odwiertów geologicznych, *Biuletyn WAT*, 56, 1, s. 245-258, 2007.
- [17] Zygmunt B., Wilk Z., Investigation of shaped charges with powder liners for geological borehole perforation, *Archives of Mining Sciences*, 52, 1, pp. 107-119, 2007.
- [18] Wilk Z., Zygmunt B., Jackowski A., Koncepcja technologii wytwarzania wkładek proszkowych do ładunków kumulacyjnych stosowanych w perforacji odwiertów geologicznych, *Biuletyn WAT*, 56, 2, s. 109-122, 2007.
- [19] Zygmunt B., Wilk Z., Formation of jets by shaped charges with metal powders liners, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 6, pp. 482-487, 2008.
- [20] Liberka G., Przybylik R., Zygmunt B. i in., *Wkładka kumulacyjna do ładunków osiowo-kierunkowych*, Patent RP nr 165310 (1994).
- [21] Zygmunt B., Wilk Z., Skóra W., Przybylik R., Liberka G., Kuśnierz T., Kupidura Z., *Sposób otrzymywania ładunków materiału wybuchowego o zwiększonej gęstości*, Patent RP nr 180696 (2001).
- [22] Wilk Z., Zygmunt B., Skóra W., Kupidura Z., Kroczek M., Kuśnierz T., *Wkładka kumulacyjna do ładunków osiowo-kierunkowych*, Patent RP nr 182314 (2001).

The Conception of the Powder Liners Technology for EFP Charges

Bogdan ZYGMUNT, Zenon WILK, Piotr KOŚLIK

Abstract. Liners mounted in shaped charges, used mainly for piercing of armours in military applications, are made of plastic metals, mainly from copper. Authors have implemented small-caliber shaped charges used in oil industry, consisting liners made of sintered metal powders. Applying flash rfg technics, has been proved that jets generated by powder liner were regular (straight and uniform) and have had high capability to perforate a steel barrier. Positive results of studies encouraged to apply a powder metallurgy technology to manufacture spherical liners for using in EFP charges. In the paper the main differences between properties of charges with conical and spherical liners were described. Technology of spherical sintered powder liners was tested. Several metallic powders were used for examining the idea of manufacturing uniform and multi-layers liners. Heavy liners consisting by mass majority of tungsten powder were produced. As results of technological works the lot of 45 mm in diameter spherical powder liners were manufactured and a lot of model EFP charges were elaborated

Keywords: EFP charge, powder metallurgy, sintered spherical liners