

Andrzej Dębski*, Jacek Janiszewski, Robert Paszkowski

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, ul. Kaliskiego, 200-095 Warszawa, Poland
* Corresponding author. E-mail: Andrzej.debski@wat.edu.pl

Otrzymano (Received) 03.02.2009

POCISKI KOMPOZYTOWE DO ĆWICZEBNEJ AMUNICJI STRZELECKIEJ

Zastosowanie nowych taktyk uwalniania zakładników przez specjalne oddziały wojska i policji oraz wprowadzenie nowoczesnych metod szkolenia strzeleckiego spowodowało, że w wielu krajach rozpoczęto poszukiwania rozwiązań technicznych, które zmniejszyłyby ryzyko przypadkowego zranienia podczas działań operacyjnych oraz ograniczyłyby skażenie ołowiem terenów strzelnic. Jednym z powszechnie akceptowanych sposobów minimalizujących powyższe zagrożenia jest stosowanie amunicji strzeleckiej zawierające bezolowiowe pociski fragmentujące. Działanie amunicji z pociskami fragmentującymi wykonanymi z kompozytu niezawierającego ołowiu polega na tym, że pocisk po uderzeniu w tarczę lub inną twardą powierzchnię ulega całkowitemu rozpadowi na drobne odłamki, które szybko wytracają swoją energię kinetyczną, powodując jedynie bardzo małe zniszczenia w bezpośrednim otoczeniu miejsca uderzenia. W ten sposób eliminuje się zjawisko rykoszetu, które jest najczęściej przyczyną obrażeń powstałych podczas działań operacyjnych w terenie zurbanizowanym lub podczas treningu strzeleckiego prowadzanego w małych strzelnicach zamkniętych. W niniejszej pracy przedstawiono sposób wytwarzania i przebadano właściwości kompozytu metalowo-ceramicznego na 9-milimetrowy pocisk fragmentujący z mieszanki proszkowej zawierającej wagowo 90% Cu, 5% WO₃ oraz 5% Al. Zaprojektowany proces wytwarzania bazuje na technologii metalurgii proszków, w której wykorzystano zjawisko wydzielania się fazy ceramicznej podczas operacji spiekania. W artykule zamieszczono wyniki badań technologicznych i balistycznych opracowanych pocisków metalowo-ceramicznych. Ponadto, ze względu na egzotermiczny charakter reakcji zachodzących podczas spiekania, przebadano wpływ ciepła reakcji na zmianę temperatury spiekania. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że pociski wykonane z opracowanego kompozytu metalowo-ceramicznego posiadają wystarczająco wysoką wytrzymałość zapewniającą spójność materiału w warunkach obciążeń dynamicznych występujących w lufie oraz podczas lotu balistycznego. Oprócz tego, dzięki obecności fazy ceramicznej w strukturze kompozytu opracowane pociski wykazują dużą zdolność do fragmentacji na bardzo drobne odłamki po uderzeniu w twardą tarczę stalową.

Słowa kluczowe: amunicja fragmentująca, spieki ceramiczno-metalowe, metalurgia proszków

COMPOSITE BULLETS FOR TRAINING AMMUNITION

With the advent of modern hostage rescue tactics and new training shooting methods, the military and police agencies of many countries began to look for technical ways to minimize overpenetration risks and to reduce lead contamination hazards on firing ranges. One widely-accepted solution is pistol ammunition containing frangible bullets. Frangible rounds usually made from free lead matrix composite are designed to break apart into small pieces when they hit walls or other hard surfaces to prevent ricochets during close-quarters combat or training shooting. This behavior of frangible bullets maximizes the round's transfer of energy to the object and minimizes the chances that pieces of the bullet will exit the object at dangerous velocities. In this paper, we propose to use the metal-ceramic composite made from the 90% Cu + 5% WO₃ + 5% Al powder mixture as a material on 9 mm frangible round. The preliminary technological process of frangible bullets material manufacturing was developed to obtain metal-ceramic composite containing an Al₂O₃ matrix. The developed technological process is based on the powder metallurgy in which the phenomenon of ceramic matrix separation is used during the sintering operation. The results of technological and ballistic investigations with frangible metal-ceramic bullets are reported in our work. Besides with a view to exothermal character of chemical reactions during sintering operation, the results of influence of reaction heat on sintering temperature is presented. Generally it was found that metal-ceramic bullets have sufficient strength to withstand the firing operation without breaking up in the barrel of the gun or in flight up to the target. Furthermore, thanks to ceramic phase, developed bullets break up into very small pieces upon impact with a hard steel plate.

Keywords: frangible ammunition, metal-ceramic sinters, powder metallurgy

WSTĘP

Zwalczanie zagrożeń związanych z terroryzmem wymaga podniesienia jakości szkolenia służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo. Bardzo istotnym elementem wyszkolenia są treningi strzeleckie odbywające się w warunkach zbliżonych do potencjalnych

działań, a więc w obiektach zamkniętych lub infrastrukturze miejskiej. Stosowanie w takich sytuacjach ślepej amunicji lub symulacji elektronicznej słabo odwzorowuje rzeczywiste realia walki. Z kolei używanie amunicji bojowej stwarza niebezpieczeństwo

zranień uczestników i obserwatorów ćwiczeń w wyniku zjawiska rykoszetu. Zjawisko to polega na tym, że pociski bądź ich fragmenty odbite od przeszkód mogą unieść znaczną część energii kinetycznej. Ponadto w szkoleniu strzeleckim w wojsku, policji i innych służbach istnieje tendencja do odchodzenia od wykorzystywania tradycyjnej amunicji bojowej. Stoją za tym głównie względy ekologiczne, bowiem pociski amunicji bojowej zawierają toksyczny ołów, który, kumulując się w kulochwytach, stwarza zagrożenia skażeniem wód gruntowych. Dodatkowo położenie strzelnic w obszarach zurbanizowanych sprawia, że trudno wokół nich zapewnić odpowiednio duże strefy bezpieczeństwa chroniące przed zagrożeniami powstającymi przy przypadkowym odbiciu pocisków od infrastruktury strzelnic. Zminimalizowanie tych zagrożeń skłania konstruktorów amunicji strzeleckiej do poszukiwania nowych rozwiązań. Jednym z akceptowanych szeroko sposobów jest stosowanie amunicji o ograniczonej strefie rażenia [1, 2]. Działanie tego typu amunicji polega na tym, że pocisk po zderzeniu z przeszkodą (np. ścianą) ulega fragmentacji na wiele drobnych cząstek, które ze względu na niewielką masę szybko tracą energię i nie stanowią zagrożenia dla osób znajdujących się w pobliżu miejsca uderzenia. W ten sposób znacząco ogranicza się zjawisko rykoszetowania, które często ma miejsce w przypadku strzelania tradycyjną bojową amunicją pistoletową.

Pociski o ograniczonej strefie rażenia są stosowane przede wszystkim w amunicji pistoletowej, rzadziej stosowane są w nabojach karabinowych. Najczęściej są to pociski pozbawione płaszcza, który przy rykoszecie stanowi największy i najniebezpieczniejszy fragment pocisku. Zazwyczaj w produkcji pocisków fragmentujących wykorzystuje się kompozyty złożone z materiału wypełniacza: najczęściej o dużej gęstości oraz z materiału wiążącego, zapewniającego spójność pociskowi zarówno w przewodzie lufy, jak i na trajektorii lotu. Wyróżnia się kilka metod wytwarzania. Do najbardziej rozpowszechnionych należy zaliczyć technologię metalurgii proszków, która pozwala otrzymać materiał kompozytowy o właściwościach fizycznych podobnych do materiałów stosowanych w amunicji tradycyjnej. Technologia ta polega ogólnie na prasowaniu w matrycy mieszanki proszkowej, której skład chemiczny jest tak dobrany, aby podczas kolejnej operacji procesu, jakim jest spiekanie, otrzymać fazę kruchą, która zapewni materiałowi pocisku wysoką zdolność do fragmentacji po uderzeniu w tarczę. W ten sposób na przykład produkuje się pociski fragmentujące z materiału spiekanego Cu-Sn [3, 4]. Inną często stosowaną technologią wytwarzania pocisków fragmentujących jest metoda wtryskowej formowania [5]. Polega ona na tym, że pocisk kształtowany jest przez wtrysk mieszanki proszkowo-polimerowej do specjalnie przygotowanej formy. Tworzywo sztuczne pełni rolę lepszą zapewniającego odpowiednią wytrzymałość materiału kompozytowego, a także jest fazą plastyczną ułatwiającą wypełnienie przestrzeni

wtryskowej, co decyduje o poprawności geometrycznej otrzymanego wyrobu. W taki sposób są produkowane pociski z materiału składającego się z proszku miedzi i nylonu.

W ostatnich latach również wśród krajowych producentów amunicji zauważa się zainteresowanie tego typu rozwiązaniami, dlatego w Wojskowej Akademii Technicznej podjęto już kilka prac doświadczalnych, mających na celu opracowanie technologii pocisków o ograniczonej strefie rażenia. Nowa metoda, zaprezentowana poniżej, polega na wykorzystaniu spiekania reakcyjnego, podczas którego dochodzi do wydzielenia fazy ceramicznej, ułatwiającej proces fragmentacji pocisku po uderzeniu w przeszkodę.

METODA SPIEKANIA REAKCYJNEGO

Tradycyjne sposoby wytwarzania spieków metalowo-ceramicznych polegają na przygotowaniu mieszanki proszków bazowych, składającej się z metalicznego proszku osnowy i proszku fazy ceramicznej, a następnie prasowaniu kształtu gotowego wyrobu w matrycy i spiekanie w fazie stałej bądź z udziałem fazy ciekłej w atmosferze ochronnej, aż do uzyskania połączenia dyfuzyjnego. W końcowym etapie procesu często stosuje się obróbki wykańczające, takie jak: obróbka cieplna, nasycanie olejami, żywicami lub niżej topliwymi metalami. Taka technologia jest z powodzeniem wykorzystywana w produkcji spieków metalowo-ceramicznych i węglików spiekanych. Większość takich wyrobów charakteryzuje się dużą kruchością, którą w przypadku węglików można zmniejszyć poprzez infiltrację metalami. Badania technologiczne [6] wykazały, że zmniejszenie kruchości można osiągnąć, stosując fazy ceramiczne o wysokiej dyspersji. Fazy ceramiczne wytwarzane poprzez mechaniczne rozdrabnianie wykazują wielkość cząstek w zakresie od kilkunastu do kilkudziesięciu mikrometrów. Istnieją sposoby wytwarzania faz drobniejszych, lecz w tym przypadku istnieje silna tendencja do łączenia się cząstek fazy ceramicznej w konglomeraty. Utrudnia to proces mieszania i podwyższa ryzyko niejednorodnego rozkładu. Sposobem na przezwycięzenie tych trudności jest wytwarzanie faz ceramicznych bezpośrednio wewnątrz spieku podczas procesu spiekania, nazywanego w tym przypadku spiekaniem reakcyjnym.

Podstawową zaletą spiekania reakcyjnego jest możliwość uzyskania bardzo drobnej fazy ceramicznej równomiernie rozmieszczonej w osnowie, bowiem jej wydzielenie następuje w wyniku reakcji chemicznych zachodzących podczas spiekania. W tej technologii skład chemiczny wstępnej mieszanki proszkowej różni się od uzyskanego w wyniku spiekania. Mieszanki proszków są tak dobierane, aby znalazły się w nich, w odpowiednich proporcjach, substraty planowanej reakcji chemicznej. Niebagatelne znaczenie ma też zapewnienie dobrego kontaktu pomiędzy reagentami, dlatego najczęściej jeden z nich bierze udział w spie-

kaniu w fazie ciekłej. Ponadto, w wyniku zachodzącej reakcji pojawiają się dodatkowe efekty cieplne, które należy uwzględnić, planując temperaturę spiekania. W większości przypadków podczas spiekania reakcyjnego wydziela się dodatkowe ciepło, co powoduje konieczność obniżenia temperatury spiekania w celu uniknięcia ryzyka stopienia wsadu.

Fazą ceramiczną łatwą do otrzymania podczas spiekania reakcyjnego jest Al_2O_3 , ponieważ powstaje ona w wyniku utleniania aluminium. Ze względu na niską temperaturę topnienia tego metalu można łatwo zaplanować procesy spiekania w fazie ciekłej, co pozwala na dobry kontakt reagentów. Źródłem tlenu w kompozycjach z aluminium mogą być powłoki tlenkowe znajdujące się na powierzchni proszków stanowiących osnowę spieku, np. proszki żelaza, miedzi i niklu. Dodatkowo w składzie mieszanki powinien znaleźć się proszek tlenku metalu, którego obecność jest pożądana z innych względów, np. dla podwyższenia gęstości wyrobu. Warunkiem, który należy zapewnić, dobierając składnik tlenkowy, jest odpowiednia relacja pomiędzy entalpią swobodną dodawanego tlenku a Al_2O_3 , warunkująca zachodzenie zaplanowanej reakcji chemicznej. Wykorzystanie podczas spiekania odpowiednich atmosfer ochronnych może mieć wpływ na przebieg reakcji szczególnie w przypowierzchniowej warstwie spieku.

TECHNOLOGIA POCISKÓW ZE SPIEKU METALOWO-CERAMICZNEGO

Na osnowę kompozytowych pocisków wytypowano elektrolityczny proszek miedzi, który jest dostępny i tani oraz ma stosunkowo wysoką gęstość po prasowaniu. Dodatek proszku aluminium umożliwi wydzielenie fazy ceramicznej Al_2O_3 w wyniku spiekania reakcyjnego. Jako dodatek tlenkowy wybrano trójtlenek wolframu, ponieważ po reakcji z aluminium wydzieli się z niego wolfram, co powinno podwyższyć masę pocisków.

Mieszanka proszków składała się z:

- 90% elektrolitycznego proszku Cu,
- 5% proszku WO_3 ,
- 5% rozpylanego proszku Al.

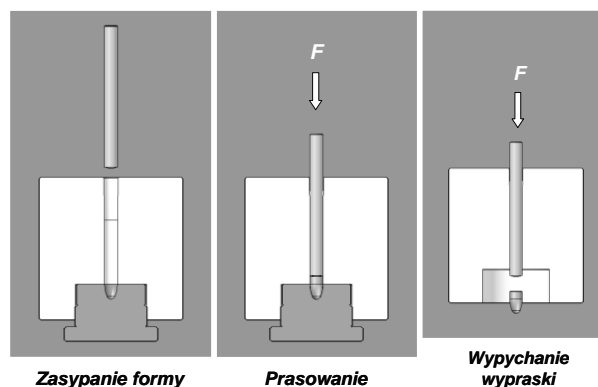
Przewidziano, że w trakcie spiekania reakcyjnego w atmosferze zdysocjowanego amoniaku pomiędzy składnikami mieszanki w wyprasce zajdą reakcje chemiczne przedstawione w tabeli 1.

Wszystkie wymienione reakcje przebiegają z wydzieleniem ciepła, które podwyższają temperaturę spiekania. Z tego powodu, w stosunku do tradycyjnego spiekania miedzi, obniżono temperaturę spiekania do 973 K. Jak wspomniano wcześniej, spiekanie przeprowadzono w atmosferze zdysocjowanego amoniaku zawierającej azot i wodór. Zastosowanie takiej atmosfery umożliwiło wywołanie dodatkowych reakcji na powierzchni spieku, w wyniku których nastąpiło

wydzielenie czystych metali (w tym przypadku głównie Cu). W ten sposób zostanie ograniczona ilość tlenków w warstwie powierzchniowej pocisku, co jest korzystne z punktu widzenia oddziaływania na przewód lufy i jej trwałość. Duża zawartość fazy ceramicznej przy powierzchni mogłaby spowodować nadmierne zużywanie przewodu lufy. Prasowanie mieszanki proszkowej wykonano w dzielonej matrycy, zapewniającej otrzymanie gotowego kształtu pocisku.

TABELA 1. Reakcje chemiczne podczas spiekania
TABLE 1. Chemical reaction during sintering

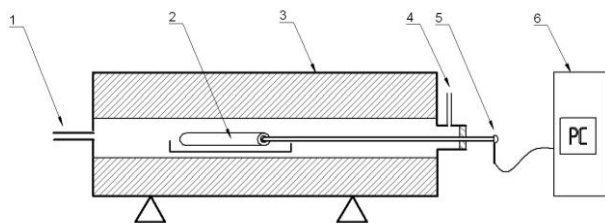
$\text{WO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{W}$	Redukcja WO_3 ciekłym Al
$3\text{CuO} + 2\text{Al} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$	Redukcja powłok tlenkowych proszku Cu
$2\text{Al} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	Utlenianie Al przez O_2 zawarty w porach
$\text{WO}_3 + 6\text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 3\text{H}_2\text{O}$	Powierzchniowa redukcja WO_3 wodorem
$\text{CuO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$	Powierzchniowa redukcja tlenku na proszku Cu



Rys. 1. Schemat prasowania pocisków

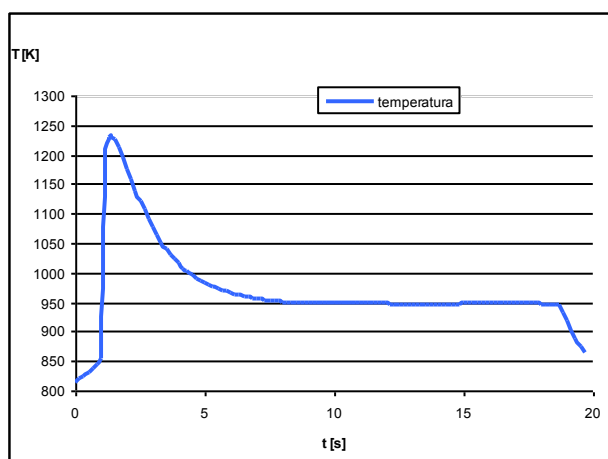
Fig. 1. Scheme of bullet pressing

Temperaturę spiekania 973 K ustalono w wyniku eksperymentu polegającego na pomiarze efektu termicznego reakcji egzotermicznych. Sprasowaną próbkę, w kształcie walca, materiału identycznego jak w przypadku pocisków poddano spiekaniu w atmosferze ochronnej. W wydrążeniu próbki umieszczono termoparę, za pomocą której zarejestrowano przebieg temperatury w czasie spiekania. Próbkę z końcówką termopary została umieszczona w piecu, w którym stopniowo podwyższano temperaturę aż do 950 K, czyli powyżej topliwości aluminium. Skokowa zmiana przebiegu temperatury wskazywała, że w próbce doszło do zaplanowanych reakcji chemicznych. Schemat eksperymentu przedstawiono na rysunku 2, a otrzymany wykres na rysunku 3. Z wykresu wynika, że zainicjowanie reakcji zachodzi bardzo szybko po przekroczeniu temperatury topnienia aluminium, a zakończenie następuje po ok. 8 sekundach. Maksymalna temperatura próbki nie przekracza temperatury 1250 K, a więc jest niższa od topnienia osnowy z miedzi.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia temperatury spiekania reakcyjnego: 1 - wlot atmosfery, 2 - próbka, 3 - piec, 4 - wylot atmosfery, 5 - termopara, 6 - rejestrator

Fig. 2. Schematic arrangement for sintering temperature measuring: 1 - reduced atmosphere intake, 2 - specimen, 3 - furnace, 4 - reduced atmosphere outlet, 5 - thermoelement, 6 - recorder



Rys. 3. Przebieg temperatury próbki podczas spiekania reakcyjnego

Fig. 3. Time variation of the specimen during reactive sintering



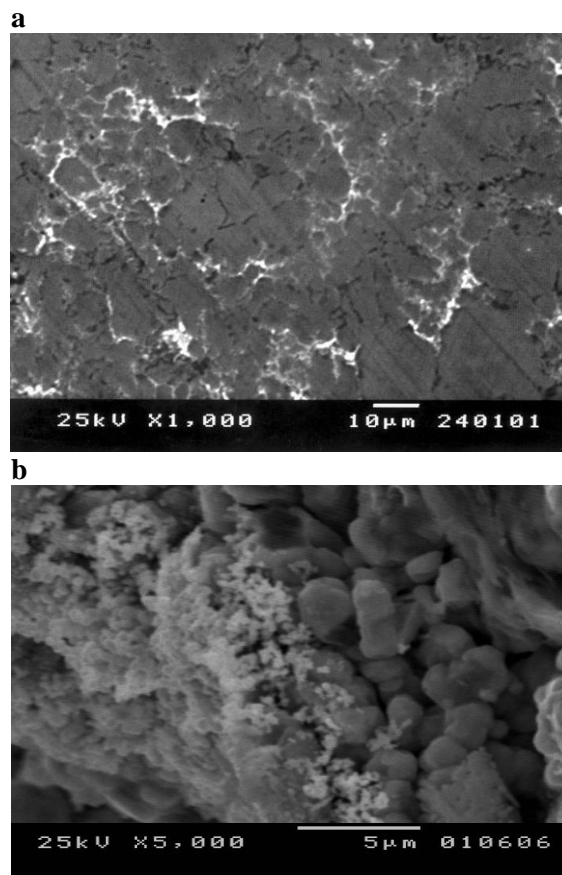
Rys. 4. Widok pocisków do amunicji 9x19 Parabellum

Fig. 4. Overview bullet for 9x19 Parabellum ammunition

BADANIA MIKROSKOPOWE POCISKÓW

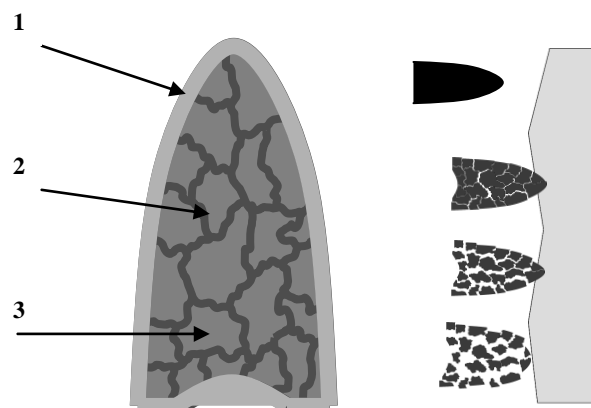
Przeprowadzono badania struktury metalograficznej pocisków przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego JEOL 5400. Wybrano technikę badań elektronowych, ponieważ spodziewano się znacznej dyspersji wydzielań ceramicznych, które trudno byłoby zidentyfikować w mikroskopii optycznej. Ponadto fazy ceramiczne ze względu na specyficzne właściwości są w mikroskopie elektronowym lepiej odróżnialne od przewodzącej prąd osnowy. Na rysunku 5 faza ceramiczna jest widoczna jako jaśniejsza siatka wy-

dzieleń wokół ziaren miedzi. Taka budowa ułatwia fragmentację, ponieważ w przypadku uderzenia w przeszkodę wystąpi zjawisko generowania pęknięć wzdłuż wydzielań ceramicznych według schematu przedstawionego na rysunku 6.



Rys. 5. Struktura pocisku: jasne wydzielenia fazy ceramicznej na tle miedzi; a) powierzchnia szlif, b) widok przełomu

Fig. 5. Bullet microstructures: light separation of ceramic phase against a background of copper; a) polished section, b) fracture surface

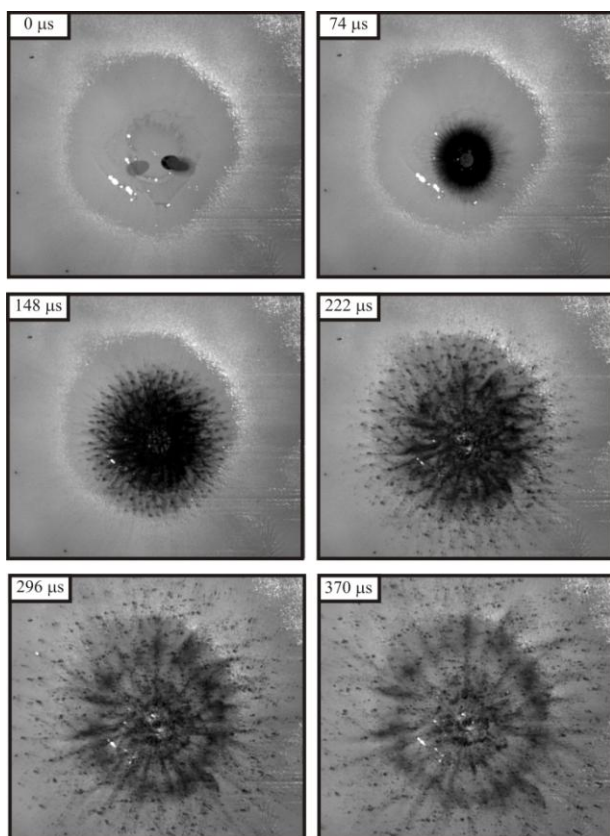


Rys. 6. Schemat mikrostruktury i fragmentacji pocisków kompozytowych: 1 - pseudopłaszcz z ograniczoną zaw. Al_2O_3 , 2 - faza ceramiczna Al_2O_3 , 3 - osnowa z Cu

Fig. 6. Scheme of structure and fragmentation process of composite bullet: 1 - quasi-jacket with limited Al_2O_3 phase, 2 - ceramic Al_2O_3 phase, 3 - Cu matrix

OCENA FRAGMENTACJI POCISKÓW WYKONANYCH ZE SPIEKU METALOWO-CERAMICZNEGO

Jakościową ocenę fragmentacji pocisków metalowo-ceramicznych wykonano na podstawie wyników rejestracji optycznych procesu zderzenia pocisku z 15-milimetrową tarczą ze stali pancernej.



Rys. 7. Zestawienie kadrów procesu fragmentacji pocisku z kompozytu metalowo-ceramicznego

Fig. 7. Frame compilation of fragmentation process of metal-ceramic composite bullet

Moment zderzenia pocisku z tarczą oraz rozlot fragmentów rejestrowano za pomocą cyfrowej kamery szybkiej Phantom v12. Kamery ustawiono pod pewnym kątem względem tarczy tak, aby oś optyczna kamery była możliwie równoległa do lotu pocisku.

Do oświetlenia powierzchni tarczy zastosowano dwa reflektory halogenowe o łącznej mocy 4 kW. W celu zminimalizowania refleksów generowanych przez układ oświetlenia powierzchnię tarczy pokryto lakierem matowym. Dzięki takim zabiegom uzyskano kadry filmowe, które dobrze obrazują rozlot odłamków powstałych w trakcie fragmentacji pocisku w chwili zderzenia.

PODSUMOWANIE

Wstępne badania nad opracowaniem kompozytów metalowo-ceramicznych do wytwarzania pocisków broni strzeleckiej o ograniczonej strefie rażenia dają obiecujące wyniki. Przebadany materiał charakteryzuje się właściwościami mechanicznymi zapewniającymi zarówno spójność podczas przemieszczania się w lufie, jak i na torze balistycznym, bardzo dobrą fragmentacją po uderzeniu w przeszkodę oraz ekologicznym składem. W przypadku zaproponowanej technologii na podkreślenie zasługuje możliwość wykorzystania tanich materiałów, redukcji ilości odpadów produkcyjnych i łatwość automatyzacji produkcji.

LITERATURA

- [1] Furmanek W., Kupidura P., Woźniak R., Analiza konstrukcyjna amunicji strzeleckiej o ograniczonej strefie rażenia pod kątem jej przydatności w działaniach wojskowych i policyjnych. Materiały III Konferencji Naukowo Technicznej, Kołobrzeg 2002.
- [2] Gacek J., Furmanek W., Współczesna ćwiczebna amunicja strzelecka, Wojskowy Przegląd Techniczny i Logistyczny 2001, 4.
- [3] Janiszewski J., Furmanek W., Kijewski J., Badania technologiczne fragmentującego się pocisku pistoletowego, V Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia - Materiały Konferencyjne, Waplewo 2004.
- [4] Abrams J.T. i in., Lead-free frangible bullets and process form making same, United States Patent 6,074,454, 2000.
- [5] Belanger G. i in., Frangible practice ammunition, United States Patent 5,237,930, 1993.
- [6] Włodarczyk E., Koperski W., Michałowski M., Balistyka końcowa spiekanych ćwiczebnych pocisków amunicji strzeleckiej o zmniejszonej zdolności rykoszetowania, Badania eksperymentalne, Biuletyn WAT 2004, 9.