



Analiza ilościowa fragmentacji próbek w warunkach dynamicznego ściskania

Adam JACKOWSKI, Marcin SARZYŃSKI

*Instytut Techniki Uzbrojenia, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,
Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

Streszczenie. W pracy zawarto projekt metodyki do oceny skłonności pocisków amunicji do fragmentacji w wyniku ich uderzenia w masywną przegrodę. Wykorzystano w niej zasady sitowej analizy granulometrycznej umożliwiającej uzyskanie ilościowego opisu zbioru odzyskanych fragmentów. Zaproponowano charakterystyki zbioru cząstek, a mianowicie udział masowy i ilościowy frakcji wymiarowych cząstek. Przeprowadzono weryfikację metodyki, wykorzystując do tego odzyskane w wyniku eksperymentu balistycznego cząstki uszkodzonych pocisków. Wyniki potwierdziły prawidłowość przyjętej metody badawczej i jej przydatność w balistycznych badaniach fragmentacji pocisków.

Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, pociski fragmentujące, balistyka końcowa amunicji strzeleckiej

1. WSTĘP

Metody stosowane do oceny ilościowej i jakościowej procesu fragmentacji pocisków są stosowane w badaniach rozwojowych nowo projektowanych pocisków, a także jako narzędzia do kontroli wyrobów przez producentów. W fazie projektowania stosowane są analizy teoretyczne, w których wykorzystywane są m.in.: model Gurneya [1] lub jego modyfikacje [2-4].

Dotyczą one przypadku prognozy fragmentacji skorupy pocisku spowodowanej wewnętrzną detonacją materiału wybuchowego (MW).

Ze względu na złożoność zjawiska i zastosowane uproszczenia w modelach teoretycznych, analizy teoretyczne mogą być wykorzystane tylko do wstępnej oceny przyjętych założeń konstrukcyjnych, materiałowych i technologicznych dotyczących projektowanego pocisku. Szczególnie jest to trudne do uwzględnienia w przypadku projektowania skorup pocisków o programowanej (wymuszonej) fragmentacji.

W przypadku gotowych wyrobów, szczególnie podczas prób odbiorczych, preferuje się badania eksperymentalne. Polegają one na zdetonowaniu MW wypełniającego wnętrze skorupy nieruchomego pocisku. Wokół badanego pocisku, w różnej odległości od centrum, umieszczane są tarcze odgrywające rolę „świadków” wykonane z materiałów perforowanych przez rozlatujące się odłamki – fragmenty pocisku. Liczba wykrytych na tarczach śladów przebicia wykorzystywana jest do porównawczej oceny stopnia fragmentacji. Metoda ta, zwana jest jako „arena test” (AT) [5], a jej modyfikacje opisywane są m.in. w pracy [6].

Istotną wadą tej metody jest to, że określana jest jedynie liczba odłamków. Sprowadza to eksperyment do oceny jakościowej, gdyż nie jest możliwe dokonanie pomiarów i klasyfikacji frakcji wymiarowych odzyskanych części fragmentowanej skorupy pocisku, a także określenie skuteczności oddziaływania pocisków odłamkowych na różne obiekty.

Ponadto zakres stosowania metod badawczych z grupy AT, ze względu na sposób wymuszenia fragmentacji, ograniczony jest do określania podatności na fragmentację odłamkowych pocisków artyleryjskich, min i bomb. Nie jest możliwe zastosowanie metody AT do badania pocisków fragmentujących (frangible) podczas uderzenia w masywną przegrodę lub jej perforacji. Powstawanie odłamków jest wynikiem specyficznego procesu ściskania pocisku wywołanego oporem tarczy oraz siłą bezwładności, a także zjawiskami falowymi związanymi z szybkością deformacji materiału pocisku. Obydwa mechanizmy odkształcania się pocisku podczas uderzenia w tarczę opisane są szczegółowo w literaturze, m.in. w pracach [7, 11].

W istniejących konstrukcjach amunicji do broni strzeleckiej, wykorzystywane jest zjawisko fragmentacji pocisku wymuszonej kinetycznym oddziaływaniem na przegrody. Przykładem mogą być pociski do nabojów stosowanych do rażenia celów lekko opancerzonych – np. powietrznych [12] lub małokalibrowa amunicja ćwiczebna [13]. W pierwszym przypadku destrukcja obiektu następuje w wyniku odłamkowego oddziaływania pocisku na wewnętrzną strukturę techniczną (np. elektronikę) po perforacji powłoki zewnętrznej obiektu i wniknięciu pocisku do jego wnętrza. W drugim przypadku, destrukcja pocisku po uderzeniu w tarczę, przyczyniając się do ograniczenia rykoszetów, zwiększa bezpieczeństwo osób postronnych.

Efekty te mają swoje istotne znaczenie w przypadku szkolenia strzeleckiego prowadzonego w warunkach małych odległości od tarczy lub zamkniętych pomieszczeń.

Na podstawie dotychczasowych wyników badań balistycznych pocisków wykonywanych z kompozytów spiekanych lub innych [14, 15] można stwierdzić, że specyfika ich fragmentacji przejawia się przede wszystkim w dużej liczbie odłamków o małych wymiarach.

Taki stan rzeczy wymaga innego podejścia do oceny zdolności do fragmentacji. Można przyjąć, że zastosowanie metod analitycznych, stosowanych w badaniach kwalifikacyjnych materiałów sypkich, po odpowiedniej modyfikacji, umożliwi wyznaczenie charakterystyk geometrycznych cząstek (odłamków), ich liczby i masy, w rozdzieleniu na frakcje wymiarowe. Dane takie mogą być wykorzystane do ilościowej analizy i oceny skłonności do fragmentacji materiałów na pociski do amunicji małokalibrowej.

W pracy podjęto próbę oceny skłonności materiałów do fragmentacji w warunkach wysokoenergetycznego zderzenia próbek z przegrodą według zaproponowanej metodyki.

2. OPIS METODY FRAGMENTACJI PRÓBEK

Analizę granulometryczną materiałów sypkich stosuje się powszechnie w wielu odmianach materiałoznawstwa, np.: w budownictwie, rolnictwie, przemyśle chemicznym, metalurgii proszków, odlewnictwie itp. [16, 17]. W badaniach specyficznych właściwości materiałów rozdrobnionych wykorzystywane są m.in. metody: mikroskopowe, sedymentacyjne, optyczne światła białego i laserowe, rentgenowskie, przesiewania i inne [18, 19]. Wśród wymienionych najczęściej stosowaną jest metoda analizy sitowej, której sposób wykonania oraz opracowanie wyników zawarte są w Polskiej Normie.

W metodzie sitowej rozdrobniony materiał przesiewany jest przez zestaw sit o różnym wymiarze oczek. Pozostające na poszczególnych sitach cząstki odpowiadają frakcjom wymiarowym. Metoda sitowa umożliwia wyznaczenie następujących parametrów sproszkowanego materiału:

1. ekwiwalentnej średniej umownej średnicy cząstek d_v wyznaczonej jako średnica okręgu wpisanego w oczko sita;
2. ekwiwalentnej średniej umownej średnicy cząstek wyznaczonej ze średniej objętości cząstek:

$$d_v = 1,243 \sqrt[3]{\frac{m_i}{n \cdot \rho_m}} \quad (1)$$

gdzie: m_i – masa cząstek rozpatrywanej frakcji wymiarowej, n – liczba cząstek we frakcji, ρ_m – gęstość materiału cząstek;

3. udziału ilościowego cząstek danej frakcji wymiarowej:

$$U_i = \frac{u_i}{u} \quad (2)$$

gdzie: U_i – udział ilościowy cząstek danej frakcji wymiarowej, u_i – liczba cząstek danej frakcji wymiarowej, u – całkowita liczba cząstek w badanej próbce;

4. udziału masowego cząstek danej frakcji wymiarowej:

$$U_m = \frac{m_i}{m} \quad (3)$$

gdzie: U_m – udział masowy cząstek danej frakcji wymiarowej, m_i – masa cząstek danej frakcji wymiarowej, m – całkowita masa cząstek w badanej próbce.

3. EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA ZAPROPONOWANEJ METODY

3.1. Przebieg i wyniki badań

Badania fragmentacji wykonano w warunkach dynamicznego ściskania próbek cylindrycznych o średnicy 9 mm i wysokości 14 mm wykonanych ze spiekanych kompozytów cermetalowych z osnową miedzianą i fazą rozproszoną w postaci azotku boru odmiany α (Cu-W-BN α). Badania efektów ściskania próbek wykonano dla różnych kompozytów zawierających odpowiednio 1,5; 3% BN α . Skład mieszanek proszkowych dobrano tak, aby gęstość teoretyczna spieków, niezależnie od zawartości fazy ceramicznej była jednakowa i wynosiła 9 g/cm³. W tabeli 1 zestawiono udziały masowe zastosowanych składników proszkowych.

Tabela 1. Skład mieszanek proszkowych zastosowanych do wykonania próbek

Table 1. Composition of powder mixtures applied to perform specimens

Gęstość teoretyczna, g/cm ³	BN α	W	Cu
	Udział masowy składnika		
9	1,5	5,2	93,3
	3	9,6	87,4

Wyprasowano dwie serie próbki, stosując ciśnienie 300 MPa i 500 MPa. Następnie próbki spiekano – wstępnie w temperaturze 600°C i końcowo w temperaturze 900°C. Wyznaczono gęstość uzyskanych spieków. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

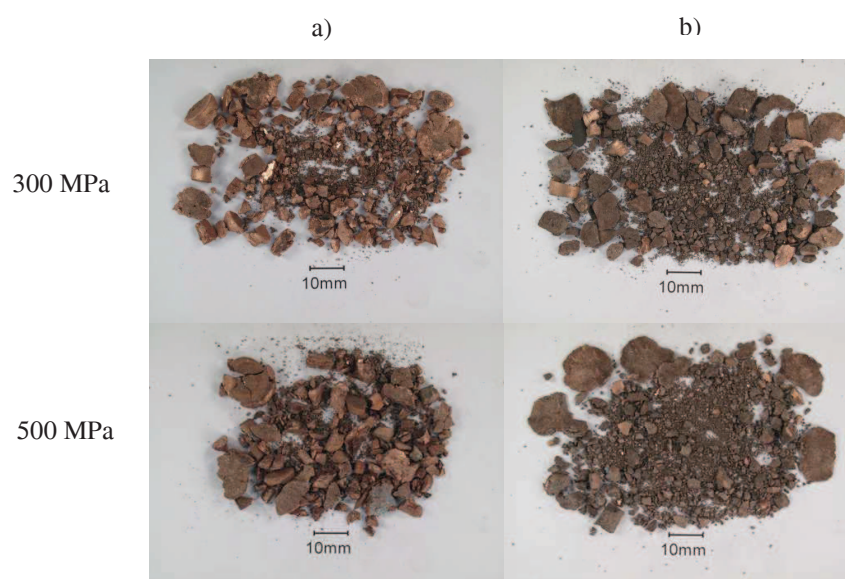
Tabela 2. Gęstość próbek prasowanych z różnym ciśnieniem po procesie spiekania

Table 2. Density of specimens compacted under different pressure after sintering

Zawartość BN α	Gęstość rzeczywista [g/cm ³]	
	Ciśnienie prasowania 300 MPa	Ciśnienie prasowania 500 MPa
1,5%	7,16	7,48
3%	7,19	7,45

3.2. Wyniki badań

Do badań dynamicznego ściskania próbek wykorzystano odpowiednio przystosowany młot Charpy'ego. Prędkość uderzenia młota wynosiła ok. 5,5 m/s, a wartość energii kinetycznej bijaka była równa 281,86 J.



Rys. 1. Widok odzyskanych fragmentów próbek po ściskaniu, próbki o zawartości: a – 1,5%, b – 3% prasowane pod różnym ciśnieniem

Fig. 1. View of recovered debris of samples after compression test: samples contains a – 1,5%, b – 3% compacted under different pressure

Na zdjęciach (rys. 1) widoczne są odzyskane po próbie cząstki zniszczonego materiału o różnych wymiarach. Na ich podstawie można jedynie zaobserwować jakościowy związek pomiędzy składem materiału próbek a wymiarami i liczbą występujących fragmentów. Szczególnie dotyczy to cząstek o najmniejszych wymiarach.

3.3. Analiza wyników badań

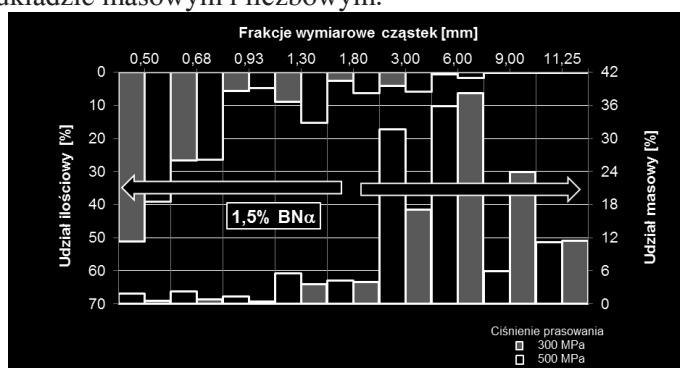
Odzyskane fragmenty zniszczonych próbek poddano analizie sitowej, wykorzystując standardowe stanowisko pomiarowe wyposażone w stół wibracyjny. Zastosowano sита o następujących wymiarach oczek: 0,5; 0,85; 1; 1,6; 2; 4; 8; 10 i 12 mm dla wszystkich przyjętych wariantów badawczych próbek. Wynikające z zestawu sit frakcje wymiarowe cząstek zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wymiary oczek sit i ekwiwalentna średnica odłamków

Table 3. Dimension of sieve meshes and equivalent diameter of the debris

Wymiar oczek sit [mm]	Średnia wielkość cząstek [mm]
frakcja podsitowa	0,5
od 0,50 do 0,85	0,675
pow. 0,85 do 1	0,925
pow. 1 do 1,6	1,3
pow. 1,6 do 2	1,8
pow. 2 do 4	3
pow. 4 do 8	6
pow. 8 do 10	9
pow. 10 do 12,5	11,25
frakcja nadsitowa	14,5

Natomiast w tabelach 4 i 5 zestawiono wyniki analizy sitowej badanych próbek w układzie masowym i liczbowym.



Rys. 2. Zestawienie udziałów ilościowych i masowych frakcji wymiarowych cząstek po ścisnieniu próbek wykonanych z cermetu 93,3% Cu – 5,2% W – 1,5% BN α

Fig. 2. Summary of the mass percent and quantitative percent of particles versus size particles after compressing test on samples from cermet 93,3% Cu – 5,3% W – 1,5% BN α

Tabela 4. Zestawienie mas poszczególnych frakcji odłamków

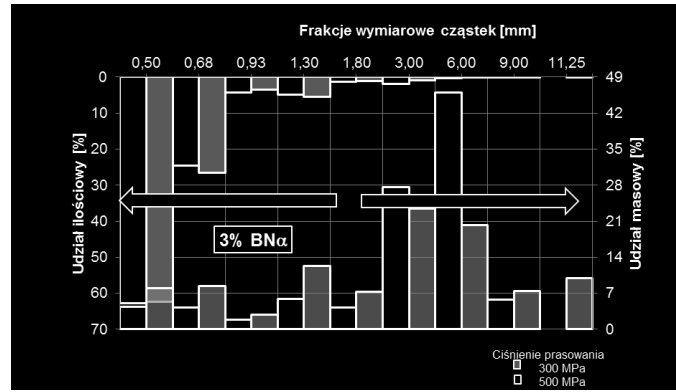
Table 4. Summary the mass each fractions of debris

Średnia umowna średnica cząstek [mm]	Ciśnienia prasowania próbek			
	300 MPa		500 MPa	
	Zawartość BN w spieku			
	1,5%	3%	1,5%	3%
	Masa cząstek (g)			
poniżej 0,5	0,425	0,794	0,016	1,208
0,675	0,546	0,768	0,145	1,272
0,925	0,3	0,346	0,134	0,429
1,3	1,314	1,08	0,256	1,85
1,8	0,998	0,762	0,321	1,102
3	7,436	5,022	0,781	3,51
6	8,42	8,35	5,876	3,048
9	1,405	1,045	1,976	1,107
11,25	2,637	0	17,758	1,485
suma	23,481	18,167	27,263	15,011

Tabela 5. Zestawienie liczby cząstek poszczególnych frakcji wymiarowych

Table 5. Summary the number of particles of each dimensional fractions

Średnia umowna średnica cząstek [mm]	Ciśnienia prasowania próbek			
	300 MPa		500 MPa	
	Zawartość BN w spieku			
	1,5%	3%	1,5%	3%
	Liczba cząstek			
poniżej 0,5	2236	4178	84	6357
0,675	588	827	156	1370
0,925	94	109	42	135
1,3	1698	1396	330	2391
1,8	37	28	12	41
3	90	60	9	42
6	16	16	11	6
9	1	1	1	1
11,25	1	0	5	1
suma	4761	6615	650	10344



Rys. 3. Zestawienie udziałów ilościowych i masowych frakcji wymiarowych cząstek po ścisnieniu próbek wykonanych z cermetu 87,4% Cu – 9,6% W – 3% BN α

Fig. 3. Summary of the mass percent and quantitative percent of particles versus size particles after compressing test on samples from cermet 87,4% Cu – 9,6% W – 3% BN α

Wzrost zawartości fazy ceramicznej i jednocześnie wzrost udziału masowego metalicznej fazy rozproszonej wpływa na wzrost liczby odłamków, a także zmniejszenie ich wymiarów. Podobne zjawisko można zaobserwować, porównując odpowiednio próbki z wyprasek prasowanych pod różnym ciśnieniem. Jednakże, przytoczone wyniki analizy w postaci bezwzględnej utrudniają jednoznaczną ocenę fragmentacji materiału próbek.

Wykorzystując uzyskane wyniki, określono następujące ilościowe wskaźniki porównawcze wielkości charakteryzujących otrzymane zbiory odłamków, a mianowicie:

- rozkład udziałów masowych poszczególnych frakcji wymiarowych w stosunku do całkowitej masy odzyskanych odłamków,
- rozkład udziałów ilościowych poszczególnych frakcji wymiarowych w stosunku do całkowitej liczby odzyskanych odłamków.

Opracowane rozkłady przedstawiono na wykresach (rys. 2 i 3). Na przedstawionych wykresach widoczna jest relacja pomiędzy udziałem ilościowym i masowym cząstek. Materiał próbek wykonanych z pierwszego ze spieków (Cu – 5,2% W – 1,5% BN α) charakteryzuje się fragmentacją o większym udziale ilościowym i masowych cząstek o wymiarach powyżej 1,8 mm niż materiał drugi. Jednocześnie wyraźnie większy jest udział ilościowy cząstek o najmniejszych wymiarach w przypadku materiału Cu – 9,6% W – 1,5% BN α . Ocena jakościowa, na podstawie fotografii, ze względu na podobieństwo wizualne próbek jest niejednoznaczna.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionej uproszczonej metodyki badań fragmentacji pocisków oraz jej eksperymentalnej weryfikacji, można sformułować następujące wnioski:

1. Zaprezentowana propozycja metodyki badań fragmentacji pocisków małowalibrowych wywoływana kinetycznym ich oddziaływaniem na tarczę, jest rozwiązaniem wstępnym.
2. Konieczna jest weryfikacja metody w oparciu o wyniki odpowiednich badań balistycznych rzeczywistych pocisków.
3. Z uwagi na przyjęte uproszczenia w określaniu liczebności i wymiarów cząstek o najmniejszych wymiarach (największej liczebności), uzasadnione jest podjęcie prób wykorzystania innych metod uzupełniających analizę sitową, np.: urządzeń do analizy granulometrycznej metodami optycznymi w podczerwieni lub świetle białym z wykorzystaniem techniki mikroskopowej i odpowiedniego oprogramowania.

Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt rozwojowy nr OR00001107.

LITERATURA

- [1] Walters W.P., Zukas J.A., *Fundamental of Shaped Charges*, John Wiley and Sons, New York – Chichester – Brisbane – Singapor, 1989.
- [2] Pearson J., *A Fragmentation Model for Cylindrical Warheads*, Naval Weapons Cente, China Lake, CA 93555 – 6001, Report NWC TP 7124, December 1990.
- [3] Angel J., *Methodology for Dynamic Characterization of Fragmenting Warheads*, U.S Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, Report ARL – SR – 179, September 2007.
- [4] Starkenberg J., Hillstrom W.W., *Benchmark Tests and Analyses for Ordnance Fragmentation and Propagation Models*, U.S Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, Report ARL TR – 2220, April 2000.
- [5] Leacher E.B., *Zone a Computer Program for Reducing Test Arena Data to Zone Data for Fragmenting Warheads*, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, Technical Memorandum 2034, March 1978.
- [6] Clarke E.V., Ruth C.R., Evans J.W., Bowen J.E., Hewit J.R., Stabile J.L., *Large Caliber Projectile Soft Recovery*, USA Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, Memorandum Report ARBRL – 03083, February 1981.

-
- [7] Cleary P.W., Elastoplastic Deformation During Projectile-Wall Collision, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, pp. 266-283, 2010.
- [8] Yarin A.L., Roisman I.V., Weber K., Hohler V., Model for Ballistic Fragmentation and Behind-Armor Derbis, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 24, pp. 171-201, 2000.
- [9] Livingstone I.H.G., Verolme K., Hayhurst C.J., Fragmentation onset velocity for different metallic projectiles using numerical simulations, *International Journal of Impact Engineering*, no 26, pp. 453-464, 2001.
- [10] von See C., Bormann K.H., Schumann P., Goetz F., Gellrich N.C., Rucker M., Forensic imaging of projectiles using cone-beam computed tomography, *Forensic Science International*, no 190, pp. 38-41, 2009.
- [11] Roisman I.V., Weber K., Yarin A.L., Hohler V., Rubin M.B., Oblique penetration of a rigid projectile into a thick elastic – plastic target: theory and experiment, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 22, pp. 707-726, 1999.
- [12] van de Voorde M., van Meerten E., 25 mm Ammunition Development, *Proceedings of the 44th G&M Conference*, April 9th 2009.
- [13] <http://www.simunition.com> (9x19 mm Greenshield Simunition)
- [14] Janiszewski A., Rutyna K., Surma Z., Furmanek W., Badania pocisków fragmujących, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, vol. LVI, nr 7, 2007.
- [15] Jackowski A., Badania balistyczne pocisków z rdzeniami wykonanymi z kompozytów bezołowiowych, *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, vol. LVI, nr 47, 2007.
- [16] Koch R., Noworta A., *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*, WNT, Wrocław, 1984.
- [17] Malczewski J., *Mechanika materiałów sypkich – operacje*, Warszawa, 1990.
- [18] Suryanarayana C., *Mechanical Alloying and Milling*, Marcel Dekker, New York, 2004.
- [19] German R.M., *Powder Metallurgy Science*, 2nd ed. Princeton, Metal Powder Industries Federation, New York, 1994.

Granulometric Method for Evaluation Sensitivity to Fragmentation of the Compressed Samples Made of Sintered Material

Adam JACKOWSKI, Marcin SARZYŃSKI

Abstract. The project of the methodology evaluation of ability to material fragmentation while impact of the cylindrical samples into massive target is presented in this paper. To the quantitative description of the recovered fragments has been used sieve analysis. It was proposed a characteristics of collection of particles, namely mass fraction and quantitative dimensional particle fraction, which were assumed as a general factor of ability to fragmentation. The verification of methodology has been made using the recovered fragments of ballistic damaged samples. Results of verification have confirmed the correctness of experimental research methods and its usefulness to the study of projectiles fragmentation.

Keywords: materials engineering, frangible projectiles, terminal ballistic small arm ammunition