



Badanie fragmentacji ściskanych dynamicznie próbek wykonanych z kompozytów Cu-W-BN α

Adam JACKOWSKI, Marcin SARZYŃSKI

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

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań udarowego ściskania próbek wykonanych ze spiekane go kompozytu cermetalowego Cu-W-BN α o różnej zawartości fazy ceramicznej, a mianowicie 0,5; 1, 1,5 i 3% (mas.). Badania ściskania wykonano na zmodernizowanym młocie Charpy'ego. Prędkość uderzenia młota wynosiła ok. 5,5 m/s, a wartość energii kinetycznej bijaka była równa 281,86 J. Odzyskane po próbach ściskania fragmenty zniszczonych próbek podano analizie sitowej. Określono udziały masowe i ilościowe poszczególnych frakcji wymiarowych fragmentów. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że istnieje powiązanie między zawartością azotku boru w kompozycie a rozkładem frakcji wymiarowych odzyskanych odłamków. Wzrost zawartości BN w kompozycie powoduje zwiększanie się liczby najmniejszych cząstek w odzyskanym materiale badawczym.

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

1. WSTĘP

Uzyskanie odpowiednich efektów szkolenia strzeleckiego wymaga prowadzenia go w realistycznych warunkach taktycznych odpowiadających rzeczywistości. Z drugiej strony specyficzny trening strzelecki nie może

stanowią zagrożenia dla strzelców ani osób postronnych, np. instruktorów. Wykorzystanie do tego celu amunicji „ślepej” spełnia tylko część warunków.

Z kolei stosowanie amunicji bojowej stanowi potencjalne ryzyko zranienia osób biorących udział w szkoleniu, zwłaszcza na strzelnicach zakrytych. Pociski po uderzeniu w przeszkodę mogą rykoszetować, stanowiąc zagrożenie dla strzelca i osób postronnych.

Dlatego zauważalny jest wzrost zainteresowania ćwiczebną amunicją strzelecką z pociskami fragmentującymi podczas uderzenia w przegrody (tarcze), np. w pracy [1]. Najczęściej wykorzystywanymi materiałami na pociski fragmentujące są kompozyty z udziałem dwóch lub więcej składników [2-3]. Jeden z nich stanowi odpowiednio wytrzymałą osnowę kompozytu, pozostałe zaś są fazą rozproszoną (FR) rozmieszczoną w osnowie. W istniejących zastosowaniach osnową może być polimer [4] lub metal, natomiast FR stanowią cząstki proszków metali lub ceramiki [5].

Uzyskana w procesie technologicznym charakterystyczna mikrostruktura kompozytu sprzyja powstawaniu i rozwojowi pęknięć. Kruche, twarde lub wytrzymałe cząstki FR stanowią nieciągłości mikrostruktury, stają się krawędziami strukturalnymi powodującymi lokalne strefy koncentracji naprężeń. Cząstki o małej wytrzymałości osłabiają materiał, ułatwiając jego destrukcję. Efekt fragmentacji pocisku powoduje rozproszenie energii kinetycznej pocisku i praktycznie uniemożliwia jego rykoszet.

Znane są teoretyczne modele opisujące przebieg i efekty fragmentacji np. w pracach [6-10], a także badania eksperymentalne opisane w pracach [11, 12], w których podejmowano m.in. próby opisu ilościowego fragmentacji pocisków modelowych. Ich zakres dotyczy przede wszystkim przypadków napędzania metalicznej cylindrycznej powłoki od wewnątrz produktami detonacji. Badania prowadzone są z wykorzystaniem typowych stopów konstrukcyjnych używanych na skorupy pocisków, np.: żeliwa, stali itp.

Fragmentacja „kinetyczna” wywołana odkształceniem pocisku modelowego z masywną przegrodą przebiega w innych warunkach. A stosowane materiały konstrukcyjne o złożonej budowie wewnętrznej są powodem tego, że do oceny zdolności do fragmentacji preferowane są badania eksperymentalne.

W przedstawionej pracy zaprezentowano wyniki badań fragmentacji kompozytu z osnową miedzianą i dwuskładnikową fazą rozproszoną składającą się z proszków: wolframu i grafitopodobnego azotku boru. Założono, że kompozycja fazy rozproszonej wprowadza do miedzianej osnowy dwa rodzaje cząstek powodujące zwiększenie podatności materiału na fragmentację. Dodatkowym czynnikiem, wynikającym z zastosowania metalurgii proszków w procesie wytwarzania, zwiększającym wrażliwość na destrukcję kompozytu jest obecność porów w mikrostrukturze materiału [13].

Celem badań było określenie wpływu zawartości azotku boru na skłonność do fragmentacji kompozytów o różnym udziale składników.

Jednocześnie podjęto próbę oceny możliwości wykorzystania wyników badań modelowych próbek, w warunkach dynamicznego ściskania na młocie Charpy'ego, do wstępnego oszacowania ich zdolności do fragmentacji. Autorzy zdają sobie sprawę z faktu znacznej rozbieżności warunków próby (prędkości ściskania) od rzeczywistości. Jednakże, uzyskane wyniki, traktowane jako wstępne, mogą być podstawą do sformułowania programu balistycznych badań fragmentacji.

2. OPIS METODY FRAGMENTACJI PRÓBEK

2.1. Próbki badań

Do badań fragmentacji wykonano próbki ze spiekanych kompozytów cermetalowych z osnową miedzianą i fazą rozproszoną w postaci azotku boru odmiany α ($\text{Cu-xW-yBN}\alpha$). Badano próbki cylindryczne w średnicy 9 mm i wysokości 14 mm. Badania efektów ściskania próbek wykonano dla różnych kompozytów zawierających odpowiednio 0,5; 1; 1,5; 3% $\text{BN}\alpha$. Skład mieszanek proszkowych dobrano tak, aby gęstość teoretyczna spieków, niezależnie od zawartości fazy ceramicznej była jednakowa i wynosiła 9 g/cm^3 . 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, $[\text{g/cm}^3]$	$\text{BN}\alpha$	W	Cu
	Udział masowy składnika [%]		
9	0,5	2,29	97,21
	1	3,76	95,24
	1,5	5,2	93,3
	3	9,6	87,4

Tabela 2. Gęstość spieków wykonanych z mieszanek proszkowych o różnym składzie

Table 2. Density of sintered specimens made of different powder mixtures composition

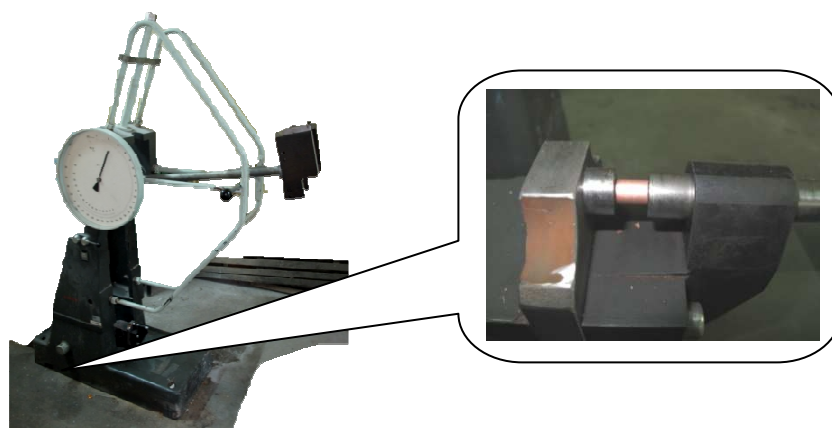
Zawartość $\text{BN}\alpha$ [%]	Gęstość spieków $[\text{g/cm}^3]$	Porowatość spieków [%]
0,5	7,52	16,4
1	7,36	18,2
1,5%	7,16	20,4
3%	7,19	20,1

Próbki wyprasowano, stosując ciśnienie 300 MPa. Następnie poddano je spiekaniu – wstępnie w temperaturze 600°C i końcowo w temperaturze 900°C. Wyznaczono gęstość uzyskanych spieków. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 2 można zauważyć, że gęstość spieków znacznie odbiega od przyjętej gęstości teoretycznej. Porowatość spieków wynosi średnio 18,78 i może mieć istotny wpływ na fragmentację próbek.

2.2. Stanowisko do badań

Do badań dynamicznego ściskania próbek wykorzystano odpowiednio przystosowany młot Charpy'ego. Zdjęcie stanowiska do badań przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widok młota Charpy'ego przystosowanego do próby ściskania

Fig. 1. Charpy machine adapted for compression tests

Prędkość uderzenia młota wynosiła ok. 5,5 m/s, a wartość energii kinetycznej bijaka była równa 281,86 J.

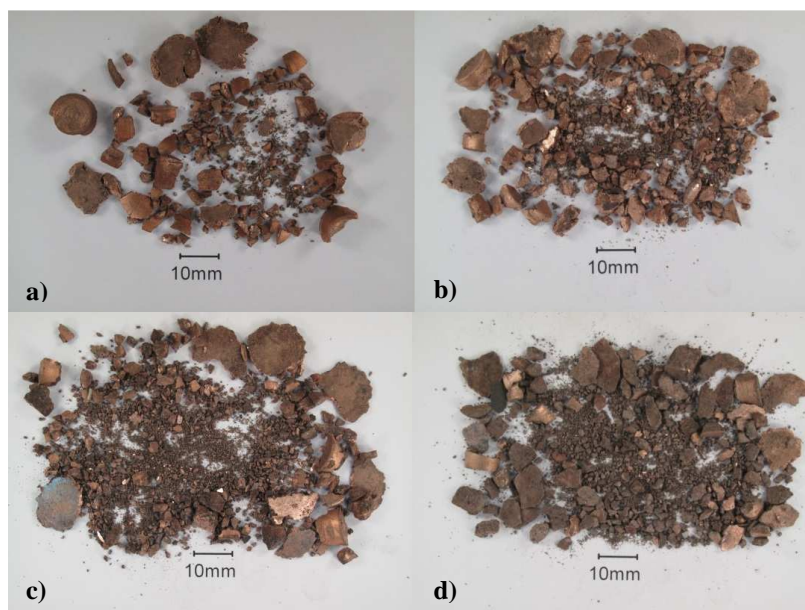
2.3. Wyniki badań

Badania ściskania wykonano na trzech próbkach dla każdego wariantu badanych kompozytów. Próbki przed badaniem oraz zebrane po próbach ich części ważono. W tabeli 3 zestawiono sumaryczne masy próbek, ich pozostałości oraz udziały odzyskania w odniesieniu do masy próbek. Z przedstawionych danych wynika, że przeciętny odzysk wynosi ok. 73%. Można zatem uznać, że uzyskane po badaniach próbki są dostatecznie reprezentatywne.

Tabela 3. Zestawienie masy próbek przed badaniami i masy odzyskanych fragmentów

Table 3. Summary mass of samples before the test and mass of recovered debris

Zawartość BN α [%]	Sumaryczna masa próbek [g]	Sumaryczna masa fragmentów [g]	Odzysk [%]
0,5	26,95	23,86	88,5
1	30,25	20,686	68,4
1,5	31,10	23,481	75,7
3	30,15	18,167	60,3

Rys. 2. Fotografie fragmentów próbek po próbie ściskania, a – 0,5%; b – 1%; c – 1,5% i d – 3% BN α Fig. 2. Fragment of specimens after compressive test a – 0,5%; b – 1%; c – 1,5% and d – 3% BN α

Fotografie zebranych po próbach fragmentów zniszczonych próbek przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie fotografii odzyskanych fragmentów próbek można zauważyć zależność liczby i wymiarów pozostałości po próbkach od zawartości fazy ceramicznej. Widoczny jest wzrost liczby cząstek o małych wymiarach wraz ze wzrostem zawartości BN α w kompozycie. Jednocześnie zauważalny jest znaczny rozrzut wymiarowy powstałych w wyniku fragmentacji cząstek.

2.4. Granulometryczna analiza wyników badań

Odzyskane fragmenty zniszczonych próbek poddano analizie granulometrycznej wg metodyki opartej na pracach [13, 14].

Tabela 4. Skład mieszanek proszkowych zastosowanych do wykonania próbek

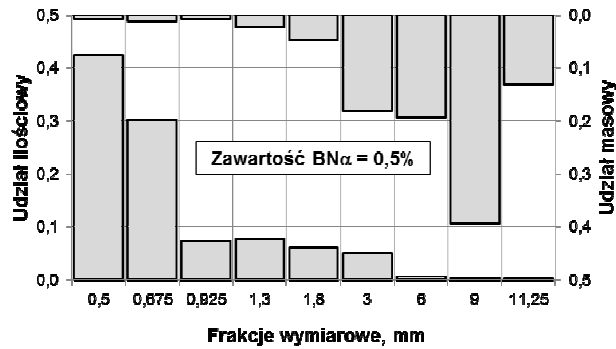
Table 4. Composition of powder mixtures applied to perform specimens

	Zawartość BN w spieku			
	0,50%	1%	1,50%	3%
Wielkość cząstek [mm]	Liczba cząstek			
	Masa poszczególnych frakcji [g]			
0,5	294	1376	722	1349
	0,173	0,81	0,425	0,794
0,675	209	794	377	530
	0,303	1,15	0,546	0,768
0,925	51	129	80	93
	0,19	0,481	0,3	0,346
1,3	53	242	127	104
	0,553	2,508	1,314	1,08
1,8	42	38	36	28
	1,151	1,045	0,998	0,762
3	34	40	58	39
	4,316	5,147	7,436	5,022
6	5	6	8	8
	4,622	5,628	8,42	8,35
9	3	0	1	1
	9,419	0	1,405	1,045
11,25	1	1	1	0
	3,13	3,701	2,637	0
suma	692	2626	1411	2152
	23,857	20,686	23,481	18,167

Zastosowano sита o następujących wymiarach oczek: 0,5; 0,85; 1; 1,6; 2; 4; 8; 10 i 12,5 mm dla wszystkich przyjętych wariantów badawczych próbek. W wyniku analizy sitowej zestawiono masy przyjętych poszczególnych frakcji wymiarowych cząstek. W tabeli 4 zestawiono wyniki analizy sitowej badanych próbek. Liczbę cząstek w odpowiedniej frakcji wymiarowej określano na podstawie średniej umownej średnicy cząstek wynikającej z wymiarów oczek sit dla danej frakcji wymiarowej, rzeczywistej masy cząstek i gęstości rzeczywistej kompozytu.

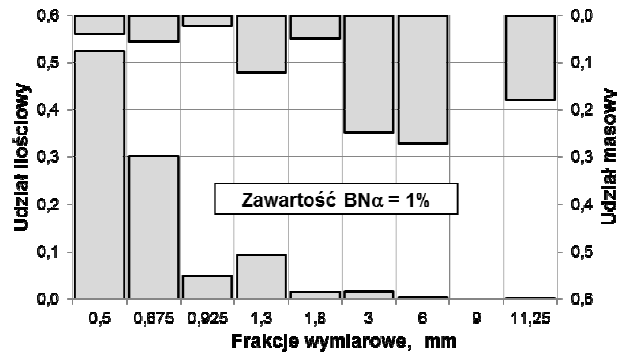
Z przedstawionych danych wynika, że w ocenie stopnia fragmentacji należy uwzględnić dwa parametry, a mianowicie: udział ilościowy i masowy rozpatrywanych frakcji wymiarowych cząstek. Z punktu widzenia niebezpiecznego oddziaływania na otoczenie istotna będzie ocena liczby i udziałów masowych odłamków o największej masie – wymiarach. W ocenie bezpieczeństwa szkolenia istotne będzie uwzględnienie w ogólnej populacji liczby odłamków o najmniejszych wymiarach – masie.

Na rysunkach 3-6 zestawiono frakcyjne charakterystyki masowe i ilościowe pozostałości po ściskaniu próbek.



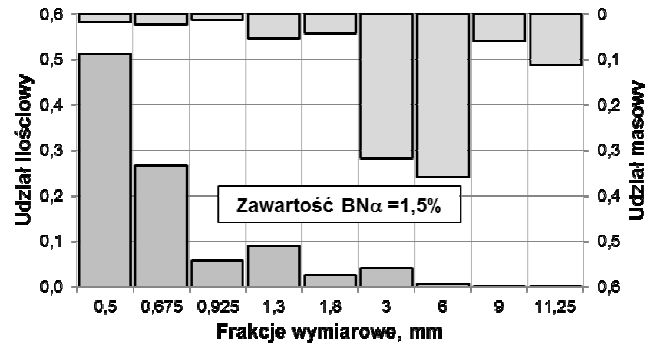
Rys. 3. Rozkład frakcyjny udziałów ilościowych i masowych odzyskanych po ściskaniu próbek o zawartości 0,5% mas. fazy ceramicznej

Fig. 3. Fractional distribution of quantitative and mass percent recovered after compression specimens with 0,5% weight ceramic phase



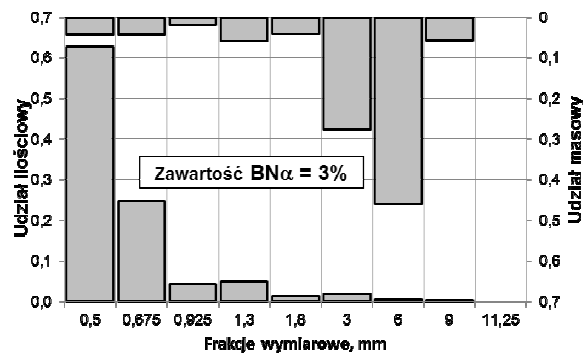
Rys. 4. Rozkład frakcyjny udziałów ilościowych i masowych odzyskanych po ściskaniu próbek o zawartości 1% mas. fazy ceramicznej

Fig. 4. Fractional distribution of quantitative and mass percent recovered after compression specimens with 1% weight ceramic phase



Rys. 5. Rozkład frakcyjny udziałów ilościowych i masowych odzyskanych po ścisnieniu próbek o zawartości 1,5% mas. fazy ceramicznej

Fig. 5. Fractional distribution of quantitative and mass percent recovered after compression specimens with 1,5% weight ceramic phase



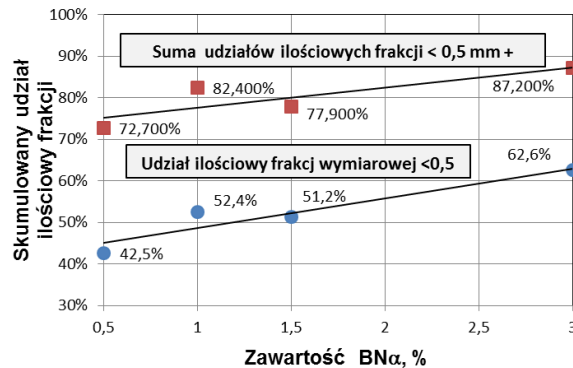
Rys. 6. Rozkład frakcyjny udziałów ilościowych i masowych odzyskanych po ścisnieniu próbek o zawartości 3% mas. fazy ceramicznej

Fig. 6. Fractional distribution of quantitative and mass percent recovered after compression specimens with 3% weight ceramic phase

Na wykresach widoczny jest powtarzający się rozkład udziałów ilościowych i masowych cząstek, a mianowicie dominującymi frakcjami wymiarowymi są cząstki przechodzące przez sita o wymiarze oczek równym 0,5 i 0,85 mm. Sumaryczny udział ilościowy wymienionych frakcji wymiarowych wynosi ok. 73% dla badanych próbek o zawartości 0,5% BN α , 82% dla 1% BN α , 78% dla 1,5% BN α i 86% dla 3% BN α .

Na rysunku 7 przedstawiono skumulowany wykres udziałów ilościowych dla dwóch dominujących frakcji wymiarowych cząstek. Można zauważyć, że udział ilościowy frakcji cząstek o najmniejszych wymiarach rośnie wraz ze wzrostem zawartości azotku boru.

Jednocześnie ze wzrostem udziałów ilościowych cząstek o wymiarach poniżej 0,5 mm z ok. 42 do 62% maleje udział cząstek o wymiarach z zakresu powyżej 0,5 mm i poniżej 0,85 mm z ok. 30 do ok. 25%.



Rys. 7. Wpływ zawartości fazy ceramicznej BN α na udziały ilościowe poszczególnych frakcji

Fig. 7. Effect the content of ceramic phase BN α on the quantitative percent of particular fractions

2.5. PODSUMOWANIE

Podsumowując przeprowadzone badania oraz ich wyniki, można sformułować następujące wnioski:

1. Rozkład frakcyjny odłamków zależy od zawartości azotku boru w kompozycie. Wraz ze zwiększeniem zawartości BN α w spieku W-Cu-BN zwiększa się zdolność do fragmentacji na mniejsze odłamki.
2. Ze względu na to, że badania udarowego ściskania prowadzone były w warunkach znacznie odbiegających od rzeczywistych, należy je uznać za wstępne i przybliżone. Brak jest dostatecznych przesłanek, aby ich wyniki mogły być wykorzystane do oceny zdolności do fragmentacji badanych cermetali.
3. Otrzymane wyniki wykazały możliwość wykorzystania zaprezentowanej metody badań do oceny zdolności do fragmentacji, jednakże wprowadzenie jej do praktyki laboratoryjnej wymaga weryfikacji na podstawie badań balistycznych w warunkach zbliżonych do rzeczywistości (prędkość zderzenia).

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

LITERATURA

- [1] <http://www.remingtonmilitary.com/ammo.htm>
- [2] <http://www.simunition.com>
- [3] <http://www.accutecusa.com>
- [4] <http://www.fiocchiusa.com/Homepage.html>
- [5] <http://www.federalpremium.com>
- [6] Freund L.B., *Dynamic Behavior of Brittle Materials*, Brown University, RI, USA, Grant No DAAL03 – 92 – G – 0107.
- [7] Banovic S.W., Mates S.P., Microscopic fracture mechanisms observed on Cu – Sn frangible bullets under quasi – static and dynamic compression, *J. Mater. Sci*, vol. 43, pp. 4840-4848, 2008.
- [8] Pearsen J., *A Fragmentation Model for Cylindrical Warheads*, Naval Weapons Center, China Lake CA 93555-6001, USA, Report NWC TP 7124, December 1990.
- [9] Reid W.D., Walsh B.E., Dynamic Fracture Properties of a Tungsten, 3.5% Ni, 1.5% Fe Alloy Under Explosive loading Conditions, *Journal De Physique III*, vol. 1, Octobre 1991.
- [10] Mates S.P., Rhorer R., Banovic S., Whitenton E., Fields R., Tensile strength measurements of frangible bullets using the diametral compression test, *Int. J. Impact engineering*, vol. 35, pp. 511-520, 2008.
- [11] Mulherin J.H., Steward W.B., Carrie J.D., *Fracture Mechanics Study on 155 mm M107E1 Projectile Made of Isothermally Transformed HF – 1 Steel*, Frankford Arsenal Philadelphia 19137, Report FA – TR – 76015, February 1976.
- [12] Livingstone I.H.G., Verolme K., Hayhurst C.J., Prediction the Fragmentation onset Velocity for Different Metallic Projectiles Using Numerical Simulations, *Int. J. Impact Engineering*, vol. 26, pp. 453-464, 2001.
- [13] German R.M., *Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industry*, 2 Sub edition (March 1994).
- [14] Angel J., *Methodology for Dynamic Characterization of Fragmenting Warheads*, Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, MD 21005 – 5069, Report ARL – SR – 179, May 2009.
- [15] 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.

Research of Fragmentation of Dynamic Compressed Samples Made of Composites Cu-W-BN α

Adam JACKOWSKI, Marcin SARZYŃSKI

Abstract. Research of the compression impact test of samples made of sintered cermets Cu-W-BN α with different contents of ceramics phase namely 0,5; 1, 1,5 i 3% (wt.) have been presented in this paper. The compression test were carried out using modified Charpy machine. The velocity of impact was 5.5 m/s and value of the kinetic energy of ram was 281,82 J. Recovered after compression tests fragments of damaged samples were subjected to a sieve analysis. The mass of particles distribution and number of particles distribution for size particle fraction were determined. On the basis of obtained results. It was found that is dependence between contents of boron nitride and particles size distribution. Increase of BN contents cause increase of the smallest particle number in investigated materials.

Keywords: materials engineering, frangible projectiles, terminal ballistic of small arms ammunition

