



Modyfikacja fragmentacji naturalnej kadłubów pocisków wywołana nadtapianiem laserowym*

Krzysztof DUTKA, Lech STARCZEWSKI

*Uniwersytet Warmińsko-Mazurski,
ul. Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn*

Streszczenie. Badania eksperymentalne przeprowadzone przez autorów zostały podjęte w celu oceny zachowania kadłubów pocisków odłamkowo-burzących podczas fragmentacji naturalnej i fragmentacji wymuszonej przez nadtapianie wiązką laserową. Badania wykazały, że modyfikacja laserowa przez obwodowe i wzdłużne nadtapianie powierzchni skorupy poprawia wskaźniki fragmentacji. Ilość i średnia masa odłamków są większe niż w przypadku kadłubów fragmentujących naturalnie. Ścieżki laserowe stają się uprzywilejowanym miejscem dla zarodkowania pęknięć. Ilość i masa odłamków związane są z parametrami nadtapiania laserowego, co pozwoli na wykorzystanie technologii do wywoływania fragmentacji wymuszonej.

Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, nadtapianie laserowe, fragmentacja kadłubów pocisków

1. WSTĘP

Pociski fragmentujące naturalnie posiadają stałą, najczęściej stalową skorupę, która rozrywa się w wyniku detonacji ładunku w sposób przypadkowy. Fragmentacja naturalna daje duże zróżnicowanie w rozkładzie i wielkości odłamków zwykle z przewagą niepożądanych odłamków dużych co jest powodem uzyskiwania niewłaściwego promienia rażenia w stosunku dożądanego celu.

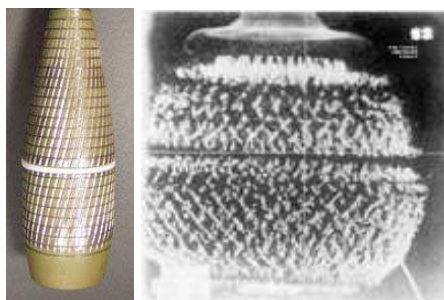
* Artykuł był prezentowany na VIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 6-8 października 2010 r.

Instytuty uzbrojeniowe w celu poprawienia skuteczności fragmentacji naturalnej czynią starania w kierunku uzyskania idealnego tworzywa z wykorzystaniem zaawansowanych procesów metalurgicznych [2, 3]. Wprowadza się również zmiany konstrukcyjne, które mają zwiększać donośność pocisku, siłę rażenia oraz precyzję trafienia w cel [1].

Rozmiar odłamków powstałych podczas fragmentacji zależy od wielkości ziarna stali, jej kruchości, plastyczności, grubości skorupy, elaboracji i rodzaju materiału wybuchowego [5]. Zecevic [7, 8] za istotne uważa kształt, wymiary geometryczne skorupy, rodzaj i masę materiału wybuchowego, sposób detonacji, miejsce umieszczenia zapalnika, rodzaj materiału, z którego wykonano kadłub (wytrzymałość, ciągliwość). Badania wykazały, że podczas fragmentacji naturalnej głowicy cylindrycznej skorupa pęka na odłamki pierwotne, długie, zorientowane poosiowo pasemka [6]. Następnie pasemka te pękają na ostateczne odłamki w dwojaki sposób – obwodowo i wzdłużnie podczas dalszej ekspansji produktów detonacji – fragmentacja wtórna.

Podczas fragmentacji kontrolowanej (wymuszonej) pękanie można wywołać przez nacięcie na powierzchni skorupy rowków, które działają jako miejsca inicjowania pęknięcia. Przez właściwy dobór odstępów między rowkami, głębokości nacięć i ich orientacji można, w pewnym zakresie tolerancji, uzyskać jednorodny rozkład masowy odłamków rozerwanej detonacją skorupy. Udało się takim sposobem uzyskać 80% fragmentację masy kadłuba na odłamki o oczekiwanej wielkości [6].

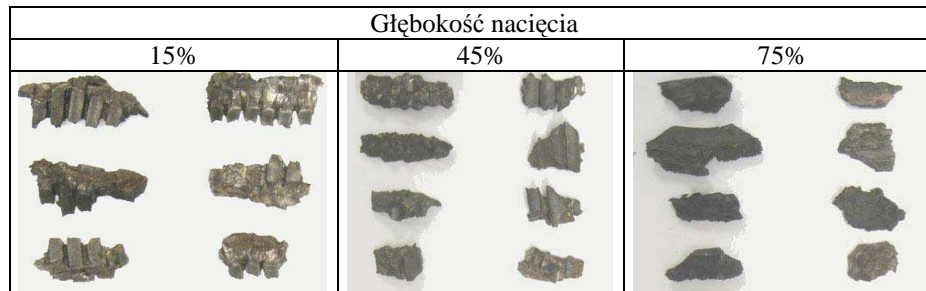
Dobrym przykładem techniki wywołania fragmentacji kontrolowanej jest sposób wykonania nacięć na powierzchni zewnętrznej pocisku moździerzowego. Rysunek 1 przedstawia układ nacięć na powierzchni zewnętrznej pocisku moździerzowego oraz sposób fragmentacji pocisku zarejestrowany metodą rentgenowską [9].



Rys. 1. Sposób wykonania nacięć na powierzchni zewnętrznej pocisku moździerzowego oraz przebieg fragmentacji zarejestrowany radiograficznie [9]

Fig. 1 The type of incision on the outer surface of a mortar and a fragmentation process registered radiographically [9]

Podczas badań fragmentacji skorup (kaliber 155 mm) wykonano nacięcia obwodowe o głębokości od 15 do 75% grubości ścianki skorupy. Skuteczność fragmentacji rosła ze wzrostem głębokości nacięć (rys. 2).



Rys. 2. Odłamki uzyskane podczas fragmentacji skorup pocisków 155 mm w funkcji głębokości nacięć ścianki skorupy [9]

Fig. 2. Fragments obtained during the fragmentation of 155 mm projectile shells as a function of the depth of the shell wall incisions [9]

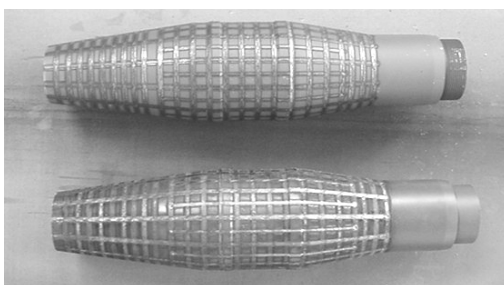
2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań było określenie możliwości poprawy wskaźników fragmentacji kadłuba pocisku odłamkowo-burzącego typu OG-15 w wyniku wytworzenia na jego powierzchni siatki nadtopień laserowych. Analiza odłamków ma pozwolić na określenie roli budowy strukturalnej powstałej w strefie nadtopionej wiązką lasera CO₂ na mechanizm pęknięcia stalowego korpusu pocisku. Zmieniona laserowo struktura tworzy w ściance kadłuba siatkę karbów naprężeniowo-strukturalnych, które mają pełnić funkcję koncentratorów naprężeń i inicjatorów pęknięcia, wzdłuż zaprogramowanych „ścieżek”. W rezultacie oczekuje się uzyskania większej liczby odłamków skutecznych w stosunku do fragmentacji naturalnej oraz możliwości wpływu na ich wielkość. Zakres badań obejmował: przeprowadzenie obróbki laserowej kadłubów, przeprowadzenie fragmentacji kadłubów z nacięciami laserowymi i bez nacięć, ocenę wizualną odłamków z kadłubów modyfikowanych laserowo i badania mikroskopowe.

3. METODYKA BADAŃ

Badania wstępne wykonano na próbkach w postaci płaskownika 60 x 12 mm ze stali 45 H ulepszonej cieplnie na twardość ok. 350 HB. Metodykę obróbki laserowej i jej wpływ na gabaryty i właściwości nadtopień przedstawiono w opracowaniu [4]. W celu wywołania fragmentacji wymuszonej powierzchnię zewnętrzną dwóch kadłubów ze stali 45 H1 pokryto siatką ścieżek (rys. 3).

Ścieżki nanoszono obwodowo i wzdłużnie tak, aby na powierzchni skorupy utworzyć oczka o powierzchni ok. 100 mm^2 . Stosując stałą prędkość przemieszczania wiązki $2,2 \text{ m/min}$, kadłub 1 pokryto, stosując moc 2500 W , a kadłub 2 – 3600 W .



Rys. 3. Widok skorup po obróbce laserowej

Fig. 3. View of the shell after laser treatment

Badania fragmentacji przeprowadzono według metodyki przedstawionej przez Starczewskiego [3]. W serii eksperymentów porównano fragmentację modeli kadłuba ze stali 45 H1 bez obróbki laserowej oraz dwóch kadłubów z powierzchnią modyfikowaną wiązką lasera.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki badań fragmentacji kadłubów modyfikowanych laserowo i bez obróbki laserowej zestawiono w tabeli 1. Kadłub 1 fragmentował na 1990 szt. odłamków, w tym 955 szt. odłamków skutecznych (o masie większej od $0,25 \text{ g}$), co stanowi ponad 96% masy skorupy. Udział odłamków o maksymalnej energii kinetycznej (o masie między $1,01$ a $6,00 \text{ g}$) wyniósł 63%.

Kadłub 2 fragmentował gorzej, rozpadając się na 1330 szt. odłamków. Uzyskano 708 szt. odłamków skutecznych, co stanowi 97% masy skorupy jednakże udział odłamków o maksymalnej energii osiągnął niecałe 45%. Wskaźniki dla skorupy tradycyjnej wyglądały następująco: ilość odłamków skutecznych 1212 szt., udział procentowy odłamków skutecznych 90,4%, udział masowy odłamków o największej energii kinetycznej ($1,01$ do $6,00 \text{ g}$) wyniósł 60,2%.

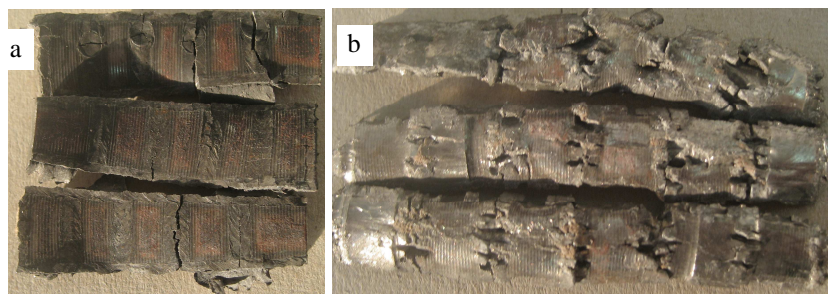
Tabela 1. Porównanie wskaźników fragmentacji dla skorup obrabianych laserowo i skorupy tradycyjnej

Table 1. Comparison of fragmentation indicators for the laser surface remelted shells and the traditional shell

Wskaźnik	Udziały procentowe w poszczególnych klasach wielkości masy odłamków, %		
	Kadłub 1 – 2500 W	Kadłub 2 – 3600 W	Kadłub tradycyjny
Udział masy odłamków skutecznych, powyżej 0,25 g, [%]	96	97	90,4
Ilość odłamków skutecznych, powyżej 0,25 g, [szt.]	955	708	1212
Udział masy odłamków w zakresie od 1,01 g do 6,00 g, [%]	63	45	61,2

Mimo różnic wskaźników fragmentacji, odłamki uzyskane z detonacji obu skorup modyfikowanych laserowo są do siebie podobne i sugerują zbliżony mechanizm pękania. Najlepiej identyfikowalne są grube odłamki powstałe z części stożkowej skorupy. Najsilniejszej fragmentacji uległa środkowa część skorupy, z której powstało najwięcej średnich i drobnych odłamków. Wśród odłamków w wielu przedziałach wagowych, dominują trzy ich rodzaje:

- odłamki obejmujące powierzchnię zewnętrzną kadłuba z części stożkowych (rys. 4a),
- odłamki obejmujące powierzchnię zewnętrzną kadłuba z części środkowych (rys. 4b),
- odłamki obejmujące powierzchnię wewnętrzną skorupy (rys. 5).



Rys. 4. Odłamki kadłubów: a) z części stożkowej, b) z części środkowej

Fig. 4. Splinters of the shell: a) from a conical part, b) from a central part



Rys. 5. Przykład odłamka od powierzchni wewnętrznej skorupy

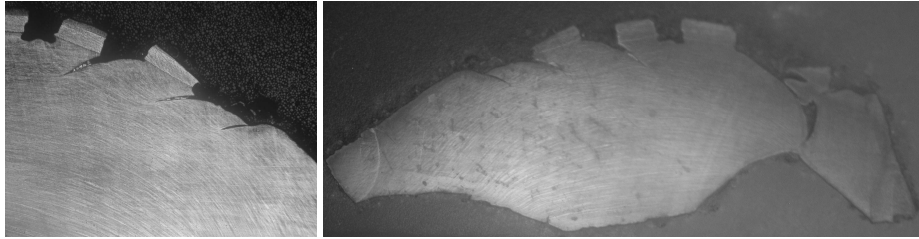
Fig. 5. Example of fragment from the inner surface of the case

Podłużny paskowaty kształt tych trzech rodzajów odłamków wskazuje, że powstały one na skutek pierwotnych pęknięć skorupy zgodnie z kierunkiem przeróbki plastycznej. W przypadku odłamków z powierzchnią zewnętrzną pęknięcia przebiegały środkiem ścieżek laserowych zorientowanych wzdłuż kierunku walcowania. Na powierzchni zewnętrznej odłamków (rys. 4a) widoczne są wyraźne ślady ścieżek laserowych zarówno tych, wzdłuż których wystąpiło pęknięcie, jak i nie uszkodzonych lub częściowo nadpękniętych ścieżek obwodowych. Pęknięcie przebiegało promieniowo na głębokość strefy nadtopionej laserem, a następnie w wyniku ścinania, którego płaszczyzna tworzyła kąt ok. 45° z normalną do powierzchni zewnętrznej. W ścieżkach obwodowych odłamków z części środkowej skorupy (rys. 4b i 7) obecne są liczne poprzeczne, równoległe do siebie pęknięcia powierzchniowe, a niekiedy również pęknięcie obwodowe.

Uwolnienie naprężeń sprężystych w momencie wystąpienia fragmentacji pierwotnej wywołało kontrakcję w odłamkach powodującą powstanie trwałych odkształceń plastycznych widocznych na zglądach (rys. 6) oraz objawiających się zaokrągleniem powierzchni zewnętrznej. Rysunek 6 przedstawia fragmenty odłamków z widoczną na powierzchni częściowo oderwaną ścieżką laserową i zapoczątkowanymi pęknięciami ścinającymi. Wysokie ciśnienie produktów eksplozji wywołało poziom naprężeń przekraczający granicę plastyczności i uruchomiło proces odkształcenia plastycznego, w wyniku którego grubość ścianki skorupy z 9-10 mm uległa zmniejszeniu do 3-4,5 mm. Fragmentacja pierwotna nastąpiła przez ścinanie adiabatyczne, którego rezultatem było utworzenie odłamków obejmujących powierzchnię zewnętrzną kadłuba (rys. 4a) i odpowiadających im odłamków z powierzchnią wewnętrzną (rys. 5). Przekrój poprzeczny tych ostatnich zbliżony jest do trójkąta równoramiennego o kącie wierzchołkowym bliskim 90° , którego ramiona uległy odkształceniom, tworząc na podstawie trójkąta (powierzchnia wewnętrzna kadłuba) powierzchnię wklęsłą o promieniu ok. 10 mm. Odkształcenie ramion wiązać należy również z kontrakcją, jakiej uległy odłamki po ścinaniu adiabatycznym.

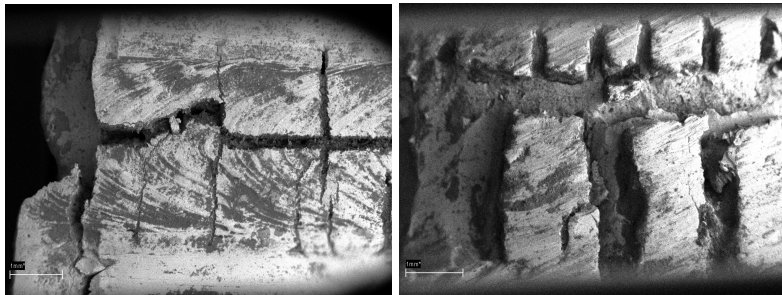
Wytrawione przekroje poprzeczne z odłamków ujawniają obecność różnorodnych pęknięć i wskazują na znaczną podatność stref zmienionych laserowo do pęknięcia (rys. 8).

Na przełomach odłamków można zaobserwować obecność ścieżek laserowych z pęknięciami jak również skrzyżowanie ścieżek (rys. 9).



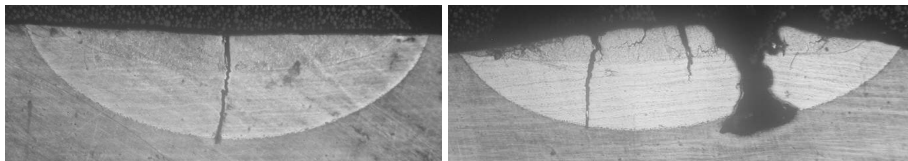
Rys. 6. Na przekroju odłamków z widoczną popękaną ścieżką laserową oraz przebieg włókien wskazujący na odkształcenie plastyczne

Fig. 6. The cross section of fragments with visible cracked laser path and the course of flow lines indicating the plastic deformation



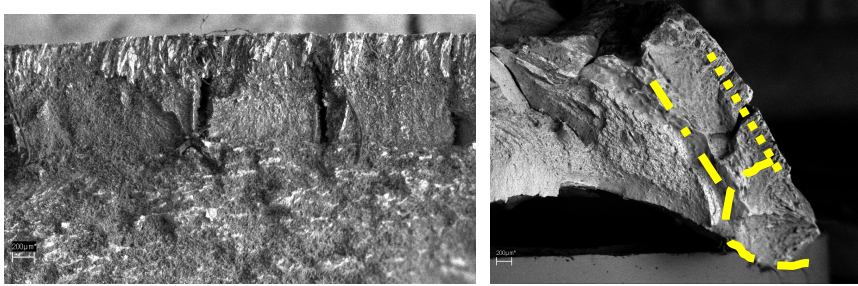
Rys. 7. Przykłady pęknięć w ścieżkach laserowych – mikroskop skaningowy

Fig. 7. Examples of cracks in the laser paths – scanning microscope



Rys. 8. Po lewej – pojedyncze pęknięcie w środku ścieżki, po prawej liczne pęknięcia w ścieżce laserowej, mikroskop optyczny

Fig. 8. On the left side – a single crack in the middle of the path, on the right side - numerous cracks in the laser path, optical microscope



Rys. 9. Powierzchnia przełomu odłamków. Widoczne pęknięcia w ścieżkach laserowych. Z prawej strony skrzyżowanie ścieżek. Mikroskop skaningowy

Fig. 9. Surface of fragment fracture. Visible cracks in the laser paths. On the right side the crossing of paths. Scanning microscope

5. WNIOSKI

Analiza wyników badań wykazała że:

1. modyfikacja laserowa powierzchni kadłubów zmienia wskaźniki fragmentacji przez wytworzenie podatnego na pękanie karbu naprężeniowo-strukturalnego,
2. fragmentacja pierwotna skorup z laserowo „naciętą” siatką rozwija się środkiem ścieżek na głębokość nadtopienia (jako pęknięcie kruche), a następnie przez ścinanie pod kątem 45° do przechodzącej przez oś ścieżki normalnej do powierzchni,
3. fragmentacja pierwotna przebiegała wzdłuż wszystkich ścieżek ułożonych wzdłużnie (zgodnie z kierunkiem obróbki plastycznej) i w 70-80% ścieżek obwodowych,
4. części stożkowe skorup fragmentują gorzej, stając się źródłem odłamków o większej masie, część środkowa jest źródłem dużej ilości odłamków drobnych,
5. ilość i masa odłamków skutecznych zależą od parametrów wiązki laserowej, co daje możliwość sterowania procesem fragmentacji.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010
jako projekt badawczy nr O N507 002733.*

LITERATURA

- [1] Bazela R., Kuśnierz T., Magier M., Pankowski Z., Analiza tendencji rozwojowych 155 mm amunicji artyleryjskiej, www.witu.mil.pl/www/biuletyn/zeszyty/20060100p/37.pdf
- [2] Stępień J., Starczewski L., Opracowanie podstaw technologii produkcji w kraju kadłubów artyleryjskich pocisków odłamkowo-burzących dużych kalibrów (do 155 mm), spełniających wymagania NATO, *Materiały konferencyjne VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”*, s. 913-921, Waplewo 2006.
- [3] Starczewski L., Eksperymentalne badania fragmentacji stalowych skorup pocisków, *Materiały konferencyjne IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Amunicja 2009”*, s. 173-183, Kołobrzeg, 23-24 kwietnia 2009 r.
- [4] Dutka K., Starczewski L., Przetapianie laserowe jako metoda umożliwiająca generowanie drogi pęknięcia w stali na amunicję odłamkową, *Materiały konferencyjne IV Konferencji Naukowo-Technicznej „Amunicja 2009”*, s. 203-212, Kołobrzeg, 23-24 kwietnia 2009 r.
- [5] Szmelter J., Yeo J., A method for predicting natural fragmentation of warheads, *Journal Of Battlefield Technology*, vol. 6, no 2, pp. 11-16, July 2003.
- [6] Pearson J., *A Fragmentation Model Applied to Shear-Control Warheads*, Naval Weapons Center, China Lake, NWC TP 7146, May 1991.
- [7] Zecevic B., Terzic J., Catovic A., Serdarevic-Kadic S., Influencing parameters on HE projectiles with natural fragmentation, *International Conference on New Trends in Research of Energetic Materials*, pp. 780-795, Czech Republic 2006.
- [8] Zecevic B., Terzic J., Catovic A., Influence of warhead case material on natural fragmentation performances, *15th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing & Automation: Globalization-Technology-Men-Nature*, 3-6 Nov. 2004, Vienna, Austria.
- [9] Rottinger P., Fong R., Ng W., *Enhanced Fragmentation Modelling U.S. ARMY ARDEC Picatinny Arsenal*, NJ, 07806.

Modification of Natural Fragmentation Warhead Cases Induced by Laser Beam Remelting

Krzysztof DUTKA, Lech STARCZEWSKI

Abstract. Experimental researches performed by authors were undertaken in order to estimate performances of warhead cases during natural fragmentation and controlled fragmentation involved by laser beam remelting. Fragmentation test showed that laser beam modification of surface by longitudinal and circumferential remelting improves the fragmentation characteristics. The number and mean mass of fragments is greater than for cases fragmenting naturally. The laser paths become privileged place for initiation of fragmentation cracking. Number and mean mass of fragments are directly connected with parameters of laser remelting what will allow using laser technology to induce controlled fragmentation.

Keywords: material engineering, laser beam remelting, fragmentation of warhead cases