

## ANALIZA CHARAKTERYSTYK FALI UDERZENIOWEJ WYBUCHU OBCIĄŻAJĄCEJ OSŁONY O RÓŻNYM KSZTAŁCIE

Piotr SASKA\*, Jerzy CZMOCHOWSKI\*\*

\* Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych  
e-mail: p.saska@wso.wroc.pl

\*\* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wroclawska  
e-mail: jerzy.czmochowski@pwr.wroc.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 2.03.2012 r. Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w maju 2012 r.

*W pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku badawczym do pomiaru charakterystyk fali uderzeniowej wybuchu, oddziaływującej na osłony o różnym kształcie. W trakcie eksperymentu zmierzono przebiegi ciśnienia fali swobodnej i odbitej obciążającej osłony ustawione w stosunku do podłoża pod różnymi kątami oraz oddalonymi od centrum ładunku wybuchowego w różnych odległościach. Badania przeprowadzono na deflektorach stosowanych w pojazdach wojskowych, zabezpieczających podwozie i nadwozie przed oddziaływaniem wybuchu. Do pomiaru ciśnienia fali odbitej użyto czujników umieszczonych w czterech miejscach na każdej osłonie. Zmierzone parametry poddano analizie pod względem wpływu kąta padania fali uderzeniowej oraz odległości od środka detonacji do obciążanego miejsca na ich wielkość.*

**Słowa kluczowe:** fala uderzeniowa, wybuch, osłony balistyczne, pojazdy wojskowe

### WSTĘP

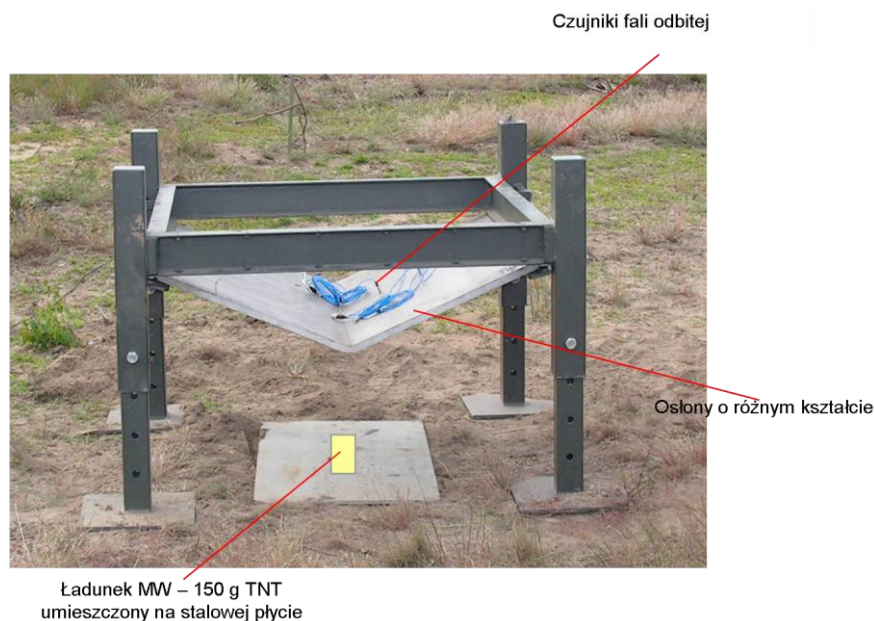
Jednym z zasadniczych wymogów stawianych przed współczesnymi pojazdami wojskowymi, wykorzystywanymi w działaniach bojowych, jest minoodporność, rozumiana jako wytrzymałość konstrukcji na ataki z użyciem środków wybuchowych w postaci min lądowych oraz improwizowanych ładunków wybuchowych (IED). Konieczność zapewnienia tej właściwości determinuje działania konstruktorów, które prowadzone są w kierunku odpowiedniego ukształtowania kadłuba, zwiększenia prześwitu oraz zastosowanie materiałów pochłaniających energię wybuchu. Kolejnym, ważnym wyznacznikiem dla inżynierów, obok wytrzymałości konstrukcji na obciążenie falą uderzeniową wybuchu, jest zdolność pojazdu do poruszania się w terenie o różnym ukształtowaniu i warunkach gruntowych.

Elementem konstrukcyjnym pojazdu, powodującym rozpraszanie energii generowanej przez eksplozję ładunku wybuchowego jest osłona (deflektor), montowana do dolnej części podwozia lub nadwozia. Kształt, kąt pod jakim ustawiona jest w stosunku

do podłoża, a także odległość od miejsca detonacji ma bezpośredni wpływ na wielkości ciśnienia fali swobodnej i odbitej oraz impulsu ciśnienia. Do bezpośredniego pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej, generowanej w trakcie eksplozji ładunków wybuchowych używane są czujniki ciśnienia fali swobodnej (padającej) i fali odbitej. Badania oddziaływania wybuchu na środowisko prowadzone są w wyspecjalizowanych ośrodkach naukowych, posiadających uprawnienia do prac z materiałami niebezpiecznymi [1, 2, 3, 6]. Ze względu na niszczący charakter zjawiska większość prób wykonywana jest na specjalnie do tego celu zaprojektowanych stanowiskach, umożliwiających ocenę wpływu charakterystyk fali uderzeniowej wybuchu na elementy konstrukcyjne wozu bojowego. Autorzy w pracy prezentują metody ocen tych zjawisk.

## 1. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO I OBIEKTU BADAŃ

Badania polegające na pomiarze przebiegów ciśnienia fali swobodnej i odbitej obciążającej osłony o różnym kształcie przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym do tego celu stanowisku badawczym (rys. 1). Dzięki odpowiedniej jego konstrukcji zmierzono parametry fali uderzeniowej, generowanej eksplozją ładunków materiału wybuchowego, o masie 150 g trotylu (TNT) i obciążającej udarowo osłony o wymiarze 1000 x 1000 mm. Podczas eksperymentu deflektory, przy pomocy tzw. ramki dociskowej i śrub, mocowane były od spodu do wykonanej z dwuteownika kwadratowej ramy połączonej na stałe z podporami, które dzięki usytuowanym w dolnej części otworom umieszczano na kolumnach na różnej wysokości.



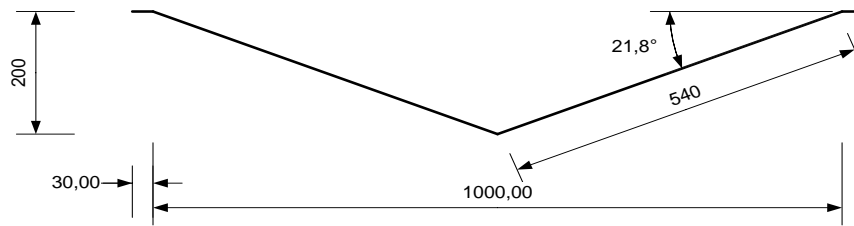
Rys. 1. Stanowisko do badania oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na osłony o różnym kształcie

*Źródło: Opracowanie własne*

Do badań zaprojektowano osłony wykonane z aluminium balistycznego o grubości 10 mm w następujących konfiguracjach:

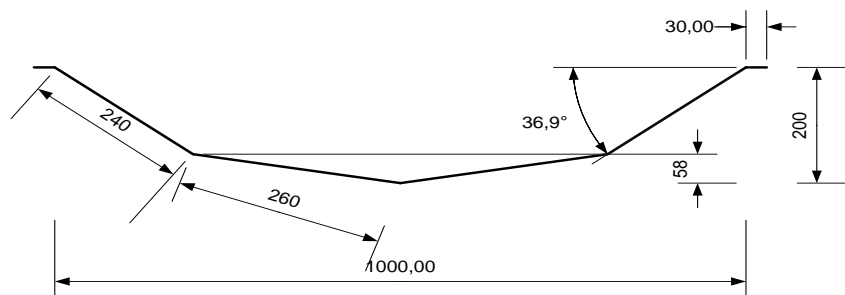
- osłony ustawione równolegle do podłoża;
- osłony w kształcie litery „V”, ustawione pod kątem  $21,8^\circ$  do podłoża (rys. 2);

– osłony w kształcie spłaszczonego „U” (rys. 3).



Rys. 2. Osłona w kształcie litery „V” umieszczona pod kątem  $21,8^\circ$  do podłoża

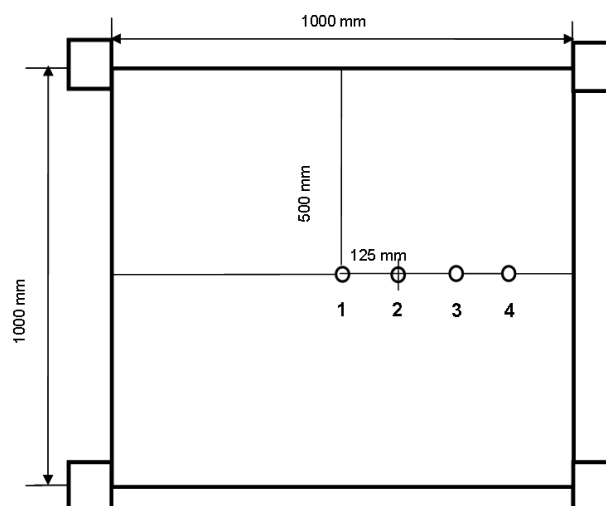
*Źródło: Opracowanie własne*



Rys. 3. Osłona w kształcie spłaszczonego „U”

*Źródło: Opracowanie własne*

Na każdym z deflektorów umieszczono cztery gniazda z czujnikami ciśnienia fali odbitej (rys. 4). Odległość pomiędzy nimi wynosiła 125 mm. Do badań zastosowano piezoelektryczne czujniki ciśnienia fali odbitej PCB Piezotronics. Czujniki te przetwarzają ciśnienie na sygnał napięciowy. Elementem sensorycznym jest kwarc. Pod wpływem przyłożonego ciśnienia, na ściankach kryształu pojawiają się ładunki elektryczne proporcjonalne do wartości przyłożonego ciśnienia. Otrzymany sygnał zapisywany był na rejestratorze LTT-184, a następnie poddany obróbce komputerowej.



Rys. 4. Rozmieszczenie czujników ciśnienia fali odbitej podczas prowadzenia eksperymentu

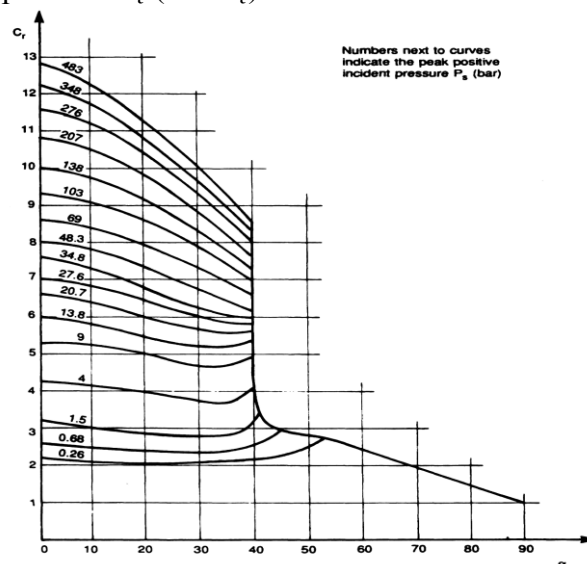
*Źródło: Opracowanie własne*

Ładunek materiału wybuchowego w postaci tzw. naboju wiertniczych, wykonanych z trotylu prasowanego ustawiany był na stalowej płycie. Odległość pomiędzy środkiem ładunku a dolną powierzchnią osłony wynosiła w zależności od jej typu od 200 do 600 mm. Dla każdego położenia wykonane zostały 2 próby.

W trakcie eksperymentu oprócz przebiegów ciśnienia fali uderzeniowej odbitej przeprowadzono pomiary wielkości ciśnienia fali swobodnej. Do tego celu zastosowano czujniki ciśnienia fali przechodzącej PCB Piezotronics, serii 137. Pozwalają one zmierzyć wartości ciśnienia niezakłóconej fali mijającej swobodnie czujnik. Podczas przeprowadzania prób zastosowano 2 tego typu urządzenia. Zostały rozmieszczone z tyłu i z boku stanowiska (na prawo) w odległości 5000 mm od środka ładunku wybuchowego.

## 2. WYNIKI BADAŃ

Fala uderzeniowa generowana eksplozją ładunków wybuchowych o masie przekraczającej 5 kg stanowi zagrożenie dla pojazdów wojskowych. Charakterystykami decydującymi o powstawaniu zagrożeń są impuls nadciśnienia i nadciśnienie. Szczególnie narażone są części denne i boczne powierzchnie pojazdu, gdyż one w pierwszej kolejności poddane są oddziaływaniu przez rozprzestrzeniającą się w różnych kierunkach falę podmuchową. W przypadku konstrukcji z płaskim dnem oraz ze względu na jego stosunkowo niewielką odległość (prześwit) od podłoża, oddziaływanie to polega na kolejno następujących po sobie odbiciach fali uderzeniowej od wymienionych powierzchni. W efekcie konstrukcja poddawana jest działaniu intensywnych, szybkozmiennych obciążeń, rozchodzących się wzdłuż jej powierzchni ze skończoną prędkością [6]. Zjawisko to powoduje wzrost wartości ciśnienia i impulsu ciśnienia. Wielkość ciśnienia odbitego może być wielokrotnie wyższa od ciśnienia fali swobodnej na czole fali uderzeniowej, które pada na przeszkodę. W pracy [1] określono, że może być ono większe od 2 do 8 razy w stosunku do ciśnienia fali swobodnej. Na rysunku 5 przedstawiono zależność współczynnika wzmocnienia ciśnienia  $C_r$  na czole fali uderzeniowej od kąta padania  $\alpha_1$  na przeszkodę (osłonę).

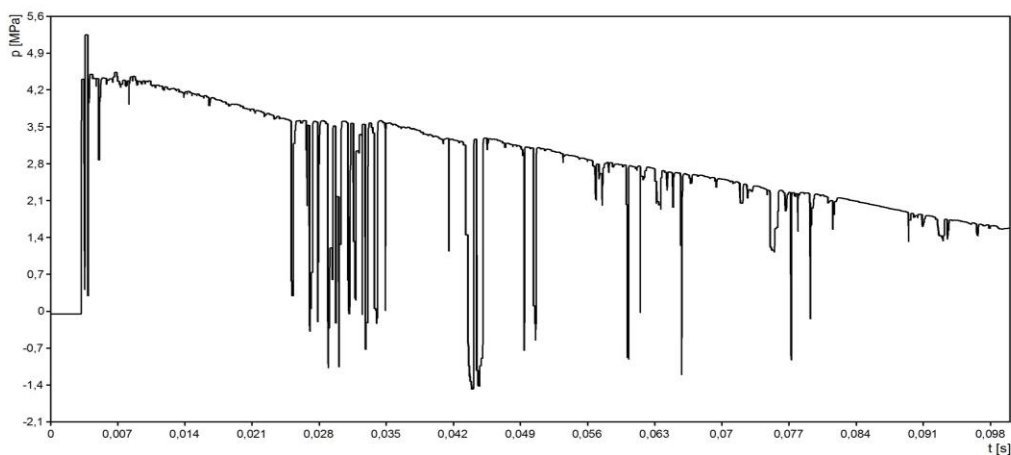


Rys. 5. Zależność współczynnika wzmocnienia  $C_r$  ciśnienia padającego podczas odbicia fali od kąta padania  $\alpha_1$

Źródło: [5]

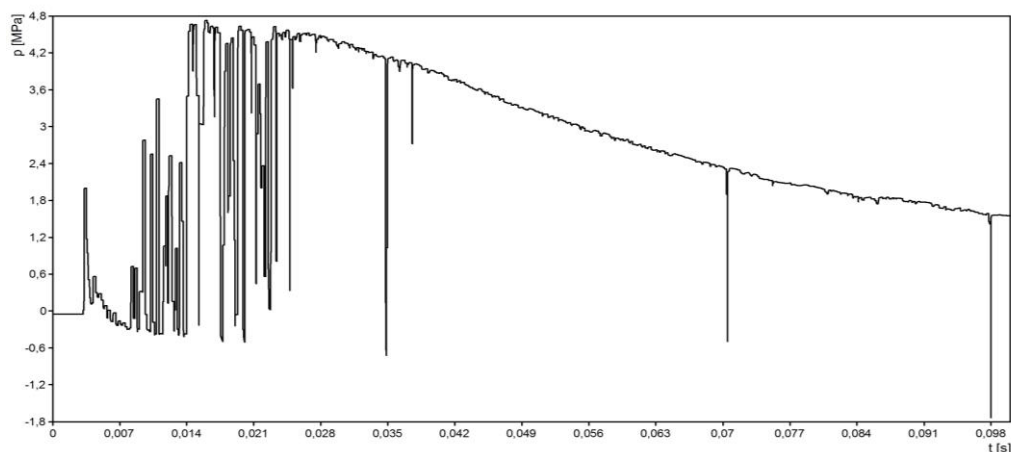
Wartość ciśnienia odbitej fali uderzeniowej znacznie maleje przy kącie padania  $\alpha_1$  większym niż  $40^\circ$  [5]. Fakt ten ma zasadnicze znaczenie przy projektowaniu konstrukcji pojazdów minodpornych MRAP (Mine Resistant Ambush Protected), których większość posiada osłony w kształcie litery „V”, nachylonych w stosunku do podłoża pod kątem zbliżonym lub większym niż  $40^\circ$ . Dzięki takiemu rozwiązaniu fala uderzeniowa, która ulega odbiciu, trafiając w ukształtowaną w ten sposób osłonę (deflektor), zmienia swój kierunek, rozchodząc się na boki i po ponownym odbiciu od podłoża nie dociera do pojazdu [7, 4].

Badanie charakterystyk fali uderzeniowej rozpoczęto od określenia przebiegów wartości ciśnienia fali odbitej dla osłon w kształcie litery „V”. Wykonano po dwie próby dla każdego położenia deflektora, który umieszczony był w odległościach 200 i 400 mm, mierząc od jego wierzchołka do środka ładunku wybuchowego. Wyniki pomiarów dla wybranego czujnika przedstawiono na rysunkach 6 – 7.



Rys. 6. Przebieg ciśnienia fali odbitej zarejestrowany na czujniku nr 2 w osłonie w kształcie litery „V” umieszczonej 200 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

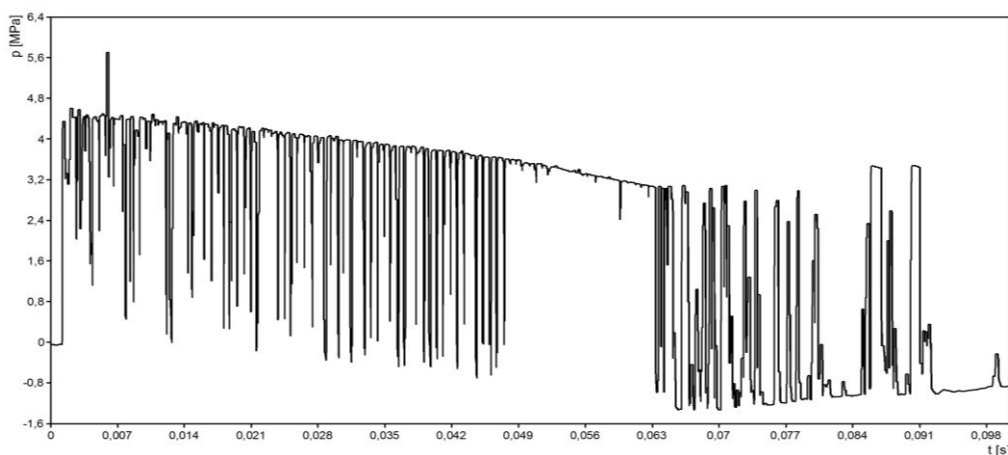


Rys. 7. Przebieg ciśnienia fali odbitej zarejestrowany na czujniku nr 2 w osłonie w kształcie litery „V” umieszczonej 400 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

Na zarejestrowanych przebiegach ciśnień fali odbitej otrzymanych dla deflektorów typu „V”, znajdujących się w odległościach 200 i 400 mm od centrum eksplozji, obserwuje się stosunkowo niewielkie różnice pomiędzy nimi. Maksymalne wartości ciśnienia nie przekraczają 5,6 MPa dla pierwszego dystansu i 4,8 MPa dla drugiego. Wydaje się, że ze względu na dwukrotnie większą odległość powinny one być bardziej znaczące. Obok wyższych wartości ciśnienia w przypadku osłony zamontowanej bliżej ładunku wybuchowego większa jest intensywność następujących po sobie kolejnych odbić fali uderzeniowej, szczególnie w przedziale czasu od 0,005 do 0,025 sekundy. Dla osłony zamontowanej w odległości 400 mm natężenie obciążenia falą odbitą jest znacznie krótsze i następuje dopiero w okresie 0,025 – 0,032 s. Czas dojścia czoła fali podmuchowej w obu przypadkach jest podobny i wynosi około 0,003 s. Okres trwania dodatkowej fazy impulsu ciśnienia oraz jego wartość jest większa dla osłony zamontowanej bliżej źródła detonacji.

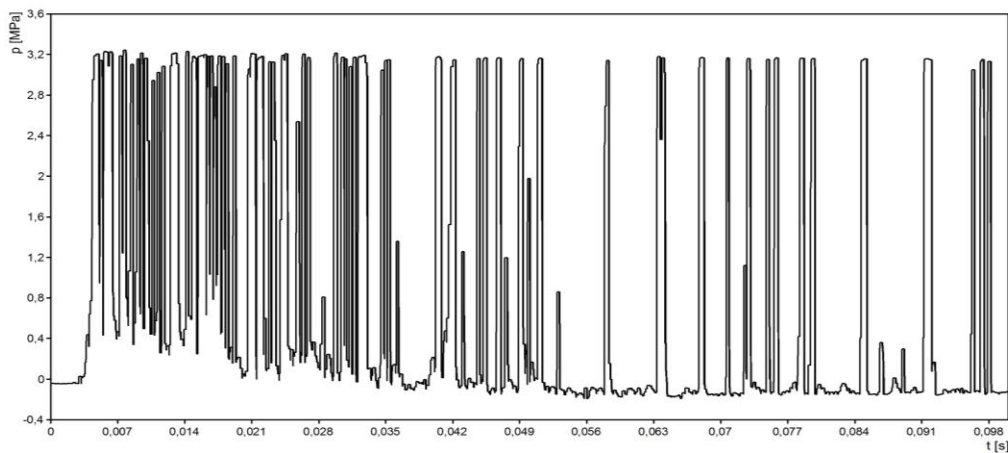
Kolejnym badanym elementem, dla którego określano przebiegi ciśnienia odbitej fali uderzeniowej był deflektor w kształcie litery „U”. Podobnie jak w przypadku osłony typu „V”, wykonano po dwie próby dla każdego położenia (200 i 400 mm). Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 8 – 9.



Rys. 8. Przebieg ciśnienia fali odbitej zarejestrowany na czujniku nr 2 w osłonie w kształcie litery „U” umieszczonej 200 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

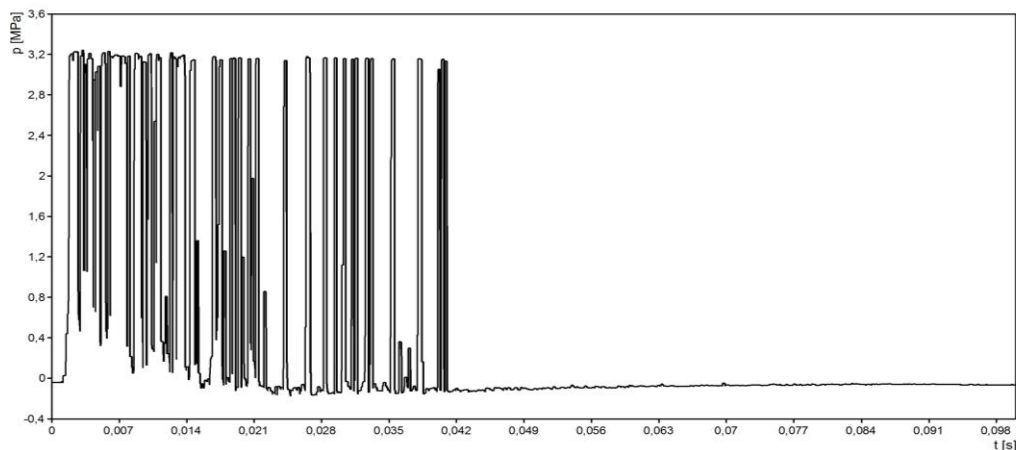
Wartości ciśnienia fali odbitej dla osłony „U”, ustawionej w odległości 200 mm od środka ładunku wybuchowego, nie wykraczają poza 6,4 MPa, zaś dla 400 mm poza 3,6 MPa. Czas dojścia czoła fali uderzeniowej do konstrukcji jest krótszy w przypadku deflektora znajdującego się bliżej miejsca eksplozji. Wynosi on około 0,0015 s. Dla dalszego położenia jest dwukrotnie dłuższy i sięga około 0,003 s. Analogicznie jak w przypadku osłon w kształcie litery „V”, większa intensywność kolejnych odbić fali podmuchowej występuje w odległości 200 mm od centrum wybuchu. Największe nasilenie następuje w przedziale 0,0015 – 0,030 s. Dla deflektora ustawionego w dwukrotnie większym dystansie od miejsca detonacji takie natężenie zachodzi w okresie 0,003 – 0,018 s. Charakteryzuje się ono także tym, że większość następujących po sobie odbić nie osiąga maksymalnych wielkości, tak jak to się dzieje w przypadku pierwszego położenia. Takie przebiegi ciśnienia powodują, że czas trwania dodatkowej fazy impulsu ciśnienia oraz jego wartość jest znacząco mniejsza.



Rys. 9. Przebieg ciśnienia fali odbitej zarejestrowany na czujniku nr 2 w osłonie w kształcie litery „U” umieszczonej 400 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

Ostatnim badanym elementem była osłona ustawiona równolegle do podłoża w odległości 400 i 600 mm od centrum eksplozji. Wyniki pomiarów dla położenia 600 mm przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Przebieg ciśnienia fali odbitej zarejestrowany na czujniku nr 4 w osłonie „płaskiej” umieszczonej 600 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

Uzyskane przebiegi ciśnienia fali odbitej dla osłony płaskiej, ustawionej w odległości 600 mm od ładunku wybuchowego potwierdzają, że pojazdy wyposażone w osłony o takim kształcie są najbardziej narażone na obciążenia impulsowe wywołane detonacją. Otrzymane wartości ciśnienia fali odbitej są zbliżone pomimo odległości większej o 200 mm od miejsca eksplozji w stosunku do osłon w kształcie litery „V” i „U”. Ciśnienie osiąga wielkość około 3,6 MPa, czyli tyle samo, co w przypadku osłony „U” usytuowanej w odległości 400 mm od środka detonacji. Czas dojścia czoła fali uderzeniowej do osłony wynosi około 0,003 s. Największa intensywność następujących po sobie kolejnych odbić fali występuje w przedziale od 0,003 do 0,020 s. Mimo znacznej odległości od centrum wybuchu, w porównaniu z osłonami typu „V” i „U”, okres trwania dodatniej fazy impulsu ciśnienia oraz jego wartość jest stosunkowo duża.

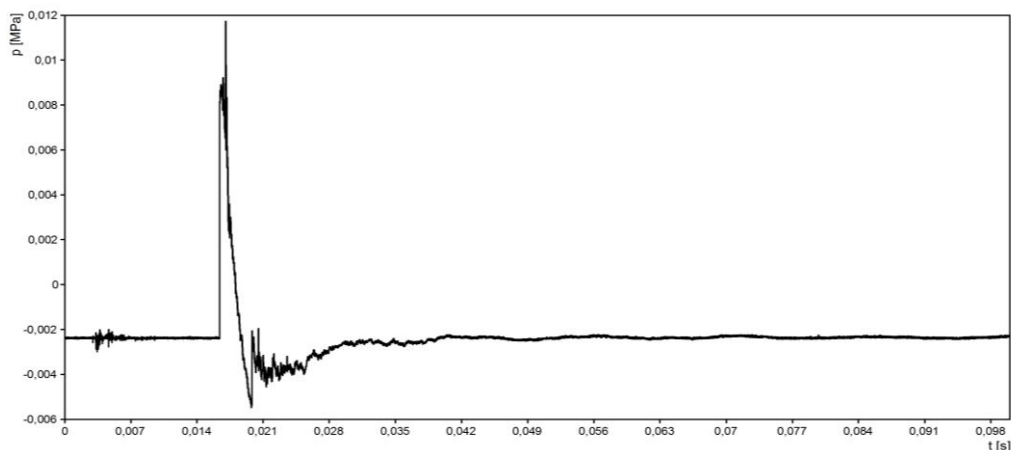
Z analizy rysunków 6 – 10 wynika, że zarejestrowane przebiegi ciśnienia fali odbitej potwierdzają zasadę, mówiącą o tym, że jego wartość zależy od kąta padania fali. W przypadku pierwszego deflektora – „V” wynosi on  $21,8^\circ$  w drugim – „U” odpowiednio  $12,5^\circ$  i  $36,9^\circ$ . Otrzymane wielkości wskazują, że mamy do czynienia z nieregularnym charakterem odbicia fali uderzeniowej (tabela 1). Różnica w przebiegach pomiędzy dwoma osłonami dla odległości 200 mm wynosi 5%, a dla 400 mm 28%. Natomiast przy kącie padania fali wynoszącym  $0^\circ$ , takim jak podczas prób z osłonami płaskimi, występuje regularne odbicie fali podmuchowej, wpływające na to, że nie ulega ona rozproszeniu na boki, a to sprawia, że wartości nadciśnienia pomimo dużej odległości od miejsca wybuchu są wysokie.

Tabela 1. Wartości ciśnienia odbitej fali uderzeniowej dla osłon typu „V” i „U”

Kąt padania fali uderzeniowej	Wielkość ciśnienia dla osłony ustawionej w odległości 20 cm od środka ładunku wybuchowego [MPa]	Wielkość ciśnienia dla osłony ustawionej w odległości 40 cm od środka ładunku wybuchowego [MPa]
$21,8^\circ$ – osłona „V”	5,6	4,8
$12,5^\circ$ i $36,9^\circ$ – osłona „U”	6,4	3,6

*Źródło: Opracowanie własne*

Kolejną charakterystyką, obok przebiegów ciśnienia odbitej fali uderzeniowej, którą określano w trakcie eksperymentu było ciśnienia fali swobodnej w odległości 5000 mm od środka ładunku wybuchowego. Wyniki przeprowadzonych pomiarów dla wybranej próby przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Przebieg ciśnienia fali swobodnej zarejestrowany w odległości 5000 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

Zarejestrowane wartości ciśnienia fali swobodnej nie przekraczają 0,012 MPa i osiągnięte są po upływie 0,017 s. Wielkości te są powtarzalne dla wszystkich prób, podczas których badano wybrane charakterystyki fali uderzeniowej obciążające osłony o różnym kształcie. Jedyną zauważalną różnicą jest wzrost wartości ciśnienia, nieprzekraczający 0,006 MPa w przedziale czasu 0,003 – 0,009 s, w przypadku osłon ustawio-



nych w odległości 200 mm od środka materiału wybuchowego, co może świadczyć o tym, że czoło przechodzącej fali uderzeniowej odbija się od osłon oraz elementów stanowiska badawczego. Całość dokonywanych pomiarów dowodzi jednak, że zarówno kształt osłony, jak i jej oddalenie od środka wybuchu w granicach kilku metrów nie wpływają znacząco na wartość ciśnienia fali przechodzącej.

## WNIOSKI

Przedstawione badania stanowią etap pracy nad optymalizacją kształtu podwozia pojazdu wojskowego, obciążonego falą uderzeniową wybuchu generowaną eksplozją ładunków wybuchowych. Pozwalają poznać lepiej zjawiska, jakie zachodzą podczas oddziaływania wybuchu na deflektory o różnym kształcie, umiejscowione w zmiennych odległościach od środka detonacji.

Przeprowadzone badania pozwalają sformułować następujące wnioski:

- wielkość ciśnienia odbitej fali uderzeniowej oraz impulsu ciśnienia w dużej mierze zależy od kształtu osłony, czyli tzw. kąta padania oraz odległości od centrum ładunku wybuchowego;
- największa intensywność następujących po sobie kolejnych odbić fali występuje do 0,030 s od momentu eksplozji;
- przy kątach mniejszych niż  $20^\circ$  występuje duże wahanie ciśnienia fali odbitej, której wartości zbliżają się do 0, po czym uzyskują wartości maksymalne;
- wartości ciśnienia swobodnej fali uderzeniowej nie zależą od kształtu osłony;

„Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010 – 2013 jako projekt badawczy Nr NN 501241139”

## LITERATURA

1. Barnat W., *Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu*, Warszawa 2010.
2. Borkowski W., Rafa J., Łęgowski Z., Rybak P., *Modelowanie propagacji powybuchowych fal uderzeniowych w przestrzeni ograniczonej dwiema sztywnymi płaszczyznami*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 11/1998, Warszawa 1998.
3. Panowicz R., Barnat W., *Wpływ umiejscowienia ładunku wybuchowego na intensywność fali podmuchowej*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 1/2010, Warszawa 2010.
4. Saska P., Czmochocki J., *Problemy oddziaływania wybuchu na pojazdy MRAP*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, 4/2010, Wrocław 2010.
5. Smith P. D., Hetherington J. G., *Blast and ballistic Loading of Structures*, Oxford 2003.
6. Trzciniński W. A., Paszula J., Trębiński R., *Badanie charakterystyk fali podmuchowej generowanej detonacją cylindrycznego ładunku kruszącego materiału wybuchowego*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 2/2003, Warszawa 2003.
7. Trzciniński W. A., Trębiński R., Cudziło S., *Badanie reakcji osłon balistycznych na obciążenie falą podmuchową i odłamkami. Część II. Analiza wyników badań*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 5-6/2005, Warszawa 2005.

## ANALYSIS OF SHOCK WAVE CHARACTERISTICS OF EXPLOSION AGAINST VARIOUSLY SHAPED SHIELDS

### Summary

*The paper presents the results of research conducted on a test bench to measure the shock wave characteristics of an explosion imposing a load on variously shaped shields. The experiment measured the run of the pressure of the free wave and the reflected one imposing a load on the shields placed at different angles with respect to the base and distanced from the centre of the explosive charge at different distances. The study was conducted on the deflectors used in military vehicles, protecting the chassis and the body against the effects of an explosion. To measure the reflected wave pressure, sensors positioned in four places on each shield were used. The measured parameters were analysed in terms of the impact of the shock wave angle and the distance from the centre of detonation to the loaded place on their size.*

**Keywords:** *shock wave, explosion, ballistic shields, military vehicles*