

## BADANIE WPLYWU KSZTAŁTU DEFLEKTORA NA PRZEBIEGI PRZYSPIESZEŃ WYMUSZONYCH EKSPLOZJĄ MAŁEGO ŁADUNKU WYBUCHOWEGO

**Piotr SASKA\***, **Damian PIETRUSIAK\*\***, **Jerzy CZMOCHOWSKI\*\***, **Artur ILUK\*\***

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

\*\* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska  
e-mail: damian.pietrusiak@pwr.wroc.pl  
e-mail: jerzy.czmochowski@pwr.wroc.pl  
e-mail: artur.iluk@pwr.wroc.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 12.12.2011 r., Zweryfikowaną i poprawioną wersję po recenzjach i korekcie otrzymano w styczniu 2012 r.

*W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przyspieszeń, które powstawały w skutek detonacji ładunków materiału wybuchowego o małej mocy. Próby poligonowe przeprowadzono na specjalnie do tego celu zaprojektowanym stanowisku badawczym. Dzięki odpowiedniej jego konstrukcji oraz właściwie dobranej aparaturze pomiarowej zmierzono przebiegi przyspieszeń pionowych dla trzech podstawowych przypadków osłon stosowanych w pojazdach odpornych na oddziaływanie wybuchu. Zarejestrowane parametry poddano analizie pod względem wpływu kąta padania fali uderzeniowej na osłonę oraz jej odległości od środka detonacji na ich wielkość.*

**Słowa kluczowe:** pojazdy minoodporne, fala uderzeniowa, wybuch, osłony balistyczne, przyspieszenia

### WSTĘP

Współczesne pojazdy wojskowe będące na wyposażeniu nowoczesnych armii cechują się wysoką odpornością balistyczną, której zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa załodze w przypadku ostrzelania go z różnego rodzaju broni, jak również ochrona przed skutkami eksplozji ładunków wybuchowych. Obecnie najliczniejszą grupą tego typu pojazdów są „MRAP-y” (Mine Resistance Resistant Ambush Protected). Nazwa ta wywodzi się od programu uruchomionego w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej w 2007 r., dzięki któremu powstało i weszło do uzbrojenia sił zbrojnych kilkunastu państw szereg konstrukcji odpornych na oddziaływanie energii wybuchu. Właściwość tę osiągnięto poprzez ukształtowanie dna pojazdu w kształcie litery „V” (V-shape), lub „U”, jak również poprzez zastosowanie nowoczesnych materiałów i struktur energochłonnych [2, 3, 4, 7].

Pomimo stosunkowo dużych osiągnięć w zakresie zapewnienia pojazdom wojskowym wysokiej odporności balistycznej połączonej z dobrymi właściwościami trakcyjnymi, badania naukowe prowadzone w wyspecjalizowanych ośrodkach nadal skupiają się na poprawie tych parametrów. Wśród badanych elementów konstrukcyjnych, odpowiedzialnych za bezpieczeństwo załogi, często próbom poddawane są montowane do dolnej części podwozia lub nadwozia osłony (deflektory). Kształt, kąt pod jakim ustawione są w stosunku do podłoża, a także odległość od miejsca detonacji ma bezpośredni wpływ na wielkości parametrów fali uderzeniowej wybuchu. Z reguły badanymi charakterystykami są ciśnienie fali swobodnej i odbitej oraz impuls ciśnienia. Bezpośrednie niebezpieczeństwo nie tyle dla samej konstrukcji, ale przede wszystkim dla załogi stwarza impuls ciśnienia, który w czasie kilku milisekund od momentu eksplozji ładunku wybuchowego wywołuje przyspieszenie, którego wartości są bardzo wysokie i powodują uszkodzenia ciała lub utratę życia przez znajdujących się wewnątrz pojazdu żołnierzy [7, 8, 13, 14]. Badania eksperymentalne z wykorzystaniem rzeczywistych pojazdów lub specjalnie do tego celu zaprojektowanych stanowisk badawczych są koniecznym warunkiem do przeprowadzenia prawidłowej oceny wpływu charakterystyk fali uderzeniowej, generowanej eksplozją różnego rodzaju ładunków wybuchowych na elementy konstrukcyjne wozu bojowego [10, 11, 16]. Autorzy w pracy prezentują analizę przyspieszeń wymuszonych detonacją niewielkiego ładunku wybuchowego.

## **1. OPIS PRZEPROWADZONYCH BADAŃ**

### **1.1. Dobór aparatury pomiarowej zastosowanej podczas eksperymentu**

Główne parametry charakteryzujące czujniki do pomiaru przyspieszeń, które muszą być odpowiednio dobrane to: zakres pomiarowy, czułość oraz odpowiedź częstotliwościowa [6, 17]. Dobór wszystkich parametrów uzależniony jest od charakteru mierzonego zjawiska. Odpowiedni zakres pomiarowy umożliwia wiarygodną rejestrację w konkretnym przedziale. Stosunek intensywności zjawiska do poziomu generowanego ładunku elektrycznego musi spełniać wymóg żądanej czułości. Odpowiedź dynamiczna musi być natomiast dobrana tak, aby czujnik był w stanie poprawnie rejestrować zmiany przyspieszeń. Na tym etapie mamy do czynienia z sygnałem analogowym, który musi zostać poddany procesowi kondycjonowania. Jest to tzw. dopasowanie sygnału przed jego zapisem. W tej sekwencji odbywa się wzmocnienie, filtracja oraz konwersja sygnału. Pozwala to uzyskać lepszej jakości sygnał pomiarowy o zadowalającym stosunku sygnału do szumu. W procesie tym podczas filtracji wyodrębnia się wstępnie sygnał z szerokiego pasma [5].

Kolejnym krokiem jest cyfryzacja, czyli zamiana sygnału analogowego na cyfrowy. Proces ten składa się z próbkowania, kwantyzacji oraz kodowania. Próbkowanie to częstotliwość zapisu w dziedzinie czasu. Jej odpowiedni dobór musi zapewniać wystarczającą rozdzielczość do prawidłowej dyskretyzacji sygnału. W dostępnej literaturze zakłada się, że częstotliwość próbkowania nie może być niższa od częstotliwości Nyquista [1, 9, 18]. Oznacza to, że liczba próbek w jednostce czasu musi być co najmniej dwukrotnie wyższa od częstotliwości mierzonego zjawiska. W praktyce przyjmuje się, że powinna ona być co najmniej czterokrotnie wyższa. Kwantyzacja to z kolei zapis wielkości wartości mierzonej. Im wyższej rozdzielczości jest przetwornik (8-, 16- czy 24-bitowy), tym dokładniejszy jest zapis. Należy pamiętać, że na poziomie dyskretyzacji sygnału (próbkowania) oraz kwantyzacji wprowadzany jest błąd. Im wyższej klasy

aparatura pomiarowa, tym możliwe jest uzyskanie zapisu lepszej jakości. Jednakże, duża częstotliwość próbkowania oraz próg kwantyzacji powoduje duży przyrost objętości zapisanych danych. Przyjęcie zbyt wysokich progów może być przyczyną problemów z zapisem i rejestracją, z powodu niemożliwości przesłania tak dużej ilości danych w wymaganym czasie. Dobór parametru dyskretyzacji i kwantyzacji powinien zapewniać rejestrację danych na wymaganym poziomie dokładności z jednoczesnym uwzględnieniem minimalizacji objętości zapisywanych danych. Ostatnim krokiem jest kodowanie, czyli rzeczywisty zapis sygnału na nośniku pamięci. Obecnie powszechnie stosowane jest kodowanie binarne.

Bardzo istotnym elementem dla prawidłowej realizacji pomiaru jest dobór punktu pomiarowego. Optymalnym rozwiązaniem jest zebranie maksymalnej ilości danych przy jak najmniejszej liczbie czujników. Głównym kryterium jakie należy przyjąć jest kierunek pomiaru przyspieszenia. Dodatkowo ze względów praktycznych należy określić takie położenie czujnika, aby nie doprowadzić do jego zniszczenia. Istotną kwestią jest również przeprowadzenie przewodów pomiarowych. Należy maksymalnie ograniczyć możliwość ich swobodnego zwisania oraz „wahania się” podczas pomiaru. Zredukuje to zakłócenia rejestrowanego sygnału i nie spowoduje ich zerwania w trakcie eksplozji ładunku wybuchowego.

Kluczowym problemem podczas przeprowadzania pomiarów jest także dobranie zakresu pomiarowego. Procedura przewiduje, że jeżeli nie znamy wartości przyspieszeń, jakie będą mierzone należy w pierwszych próbach ustawić maksymalny zakres pomiarowy. Pozwoli to zorientować się, jakiego rzędu rejestrowane są wartości przyspieszeń i wprowadzić optymalne nastawy dla kolejnych prób.

Wśród czynników mogących wpływać negatywnie na zapis wartość wielkości mierzonej, które wymieniono powyżej mogą zdarzyć się błędy związane z mechanicznym uszkodzeniem kabli i czujników, błędy modułów akwizycji (hardware'owe), błędy systemu akwizycji (software'owe), zarejestrowane losowe impulsy i zjawiska, zakłócenia elektryczne i elektroniczne, niepoprawne zastosowanie lub brak filtrów (np. antyaliasingowych).

Podczas przeprowadzania eksperymentu do pomiaru przyspieszeń pionowych zastosowano akcelerometr (czujnik przyspieszenia) PCB Piezotronics, serii 350B21 (rys. 1). Umożliwia on rejestrację do częstotliwości 10 kHz i wytrzymuje przeciążenia aż do 200 g (g – przyspieszenie ziemskie). Podobnie jak w większości tego typu urządzeń wewnątrz czujnika znajduje się piezoelektryk z przytwierdzoną masą sejsmiczną, która pod wpływem działającego przyspieszenia odkształca kryształ, który z kolei generuje ładunek elektryczny. Otrzymany sygnał zapisywany był na rejestratorze LTT-184, który umożliwia próbkowanie w przedziale od 1 kHz aż do 20 MHz. Jego rozdzielczość to 16 bitów. Te parametry, a zwłaszcza bardzo wysoka częstotliwość próbkowania umożliwiły rejestrację przebiegu fali uderzeniowej wybuchu generowanej detonacją małego ładunku wybuchowego.

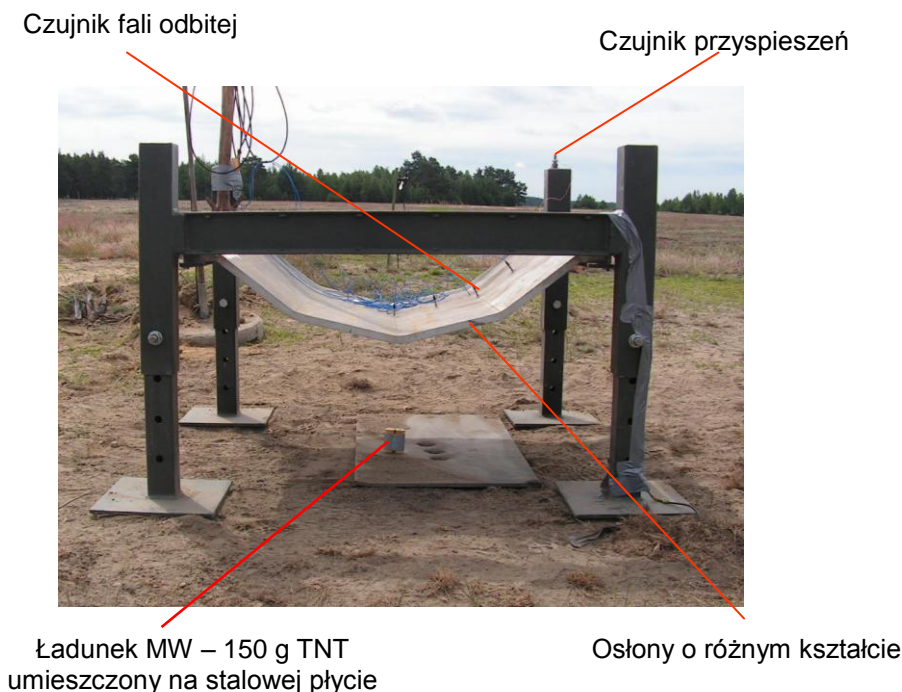


Rys. 1. Czujnik przyspieszeń PCB Piezotronics, serii 350B21

Źródło: [http://www.pcb.com/spec\\_sheet.asp?model=350B21&item\\_id=13961](http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=350B21&item_id=13961)

## 1.2. Konstrukcja stanowiska badawczego

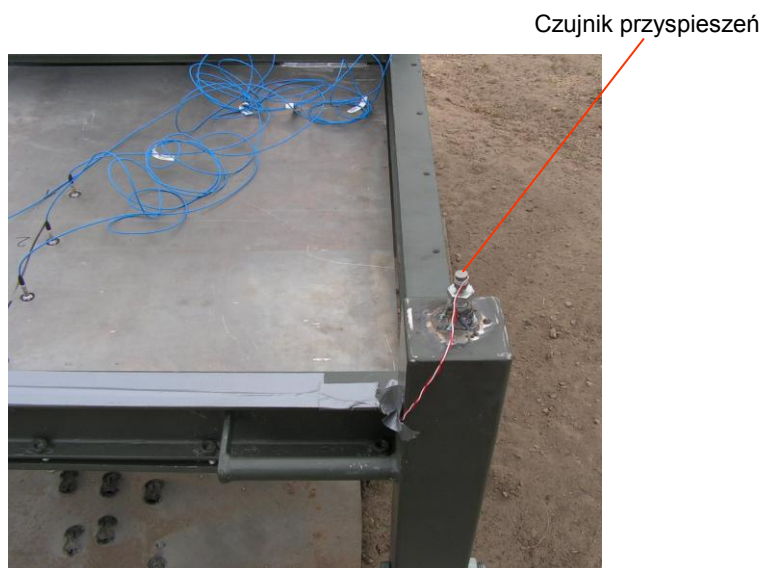
Badania eksperymentalne zrealizowano dla trzech typów osłon na specjalnie zaprojektowanym do tego celu stanowisku badawczym (rys. 2). Dzięki odpowiedniej jego konstrukcji zmierzono przebiegi przyspieszeń pionowych, wywołanych przez impuls ciśnienia, generowany eksplozją ładunków materiału wybuchowego o masie 150 g trotylu (TNT) i obciążający udarowo osłony o wymiarze 1000 x 1000 mm. W trakcie eksperymentu deflektory umieszczano na kolumnach na różnej wysokości.



Rys. 2. Stanowisko do badania oddziaływania fali uderzeniowej wybuchu na osłony o różnym kształcie

Źródło: Opracowanie własne

Wielkości przyspieszeń wyznaczano dla trzech podstawowych typów osłon stosowanych w pojazdach minoodpornych, tj.: osłon w kształcie litery „V”, osłon w kształcie spłaszczonego „U” oraz osłon płaskich, ustawionych równoległe do podłoża [15]. Akcelerometr umieszczono na wierzchu prawej tylnej kolumny w odległości 1200 mm od środka ładunku wybuchowego (rys. 3).



Rys. 3. Miejsce umieszczenia czujnika przyspieszeń

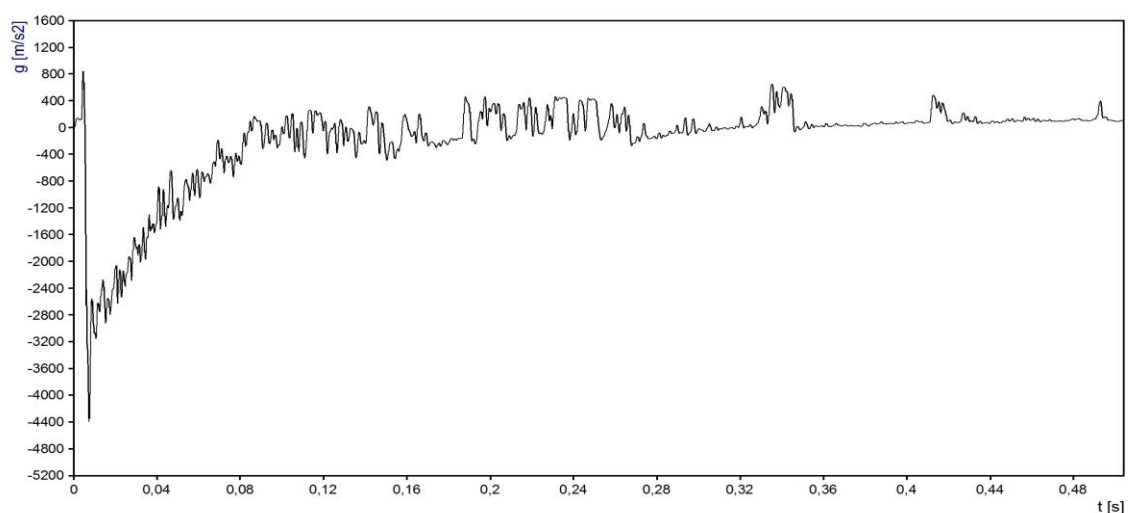
*Źródło: Opracowanie własne*

Ładunek materiału wybuchowego 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.

## 2. WYNIKI BADAŃ

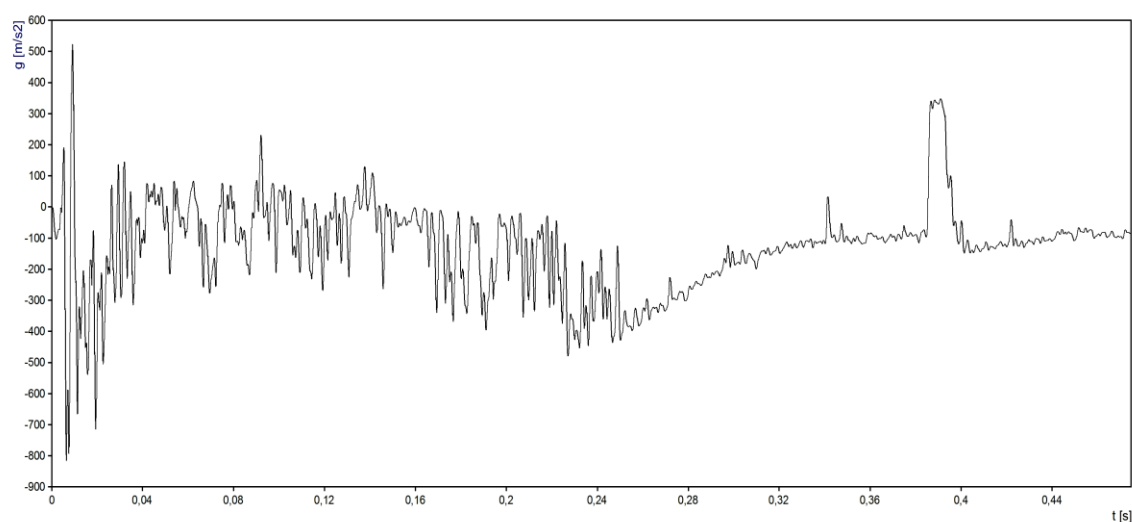
Eksplozja ładunku wybuchowego pod kadłubem pojazdu może powodować, uszkodzenia zewnętrznej warstwy konstrukcji, jak również skutkować obrażeniami załogi lub utratą życia. Fala uderzeniowa generowana nawet przez niewielki ładunek materiału wybuchowego może wywołać trwałe deformacje dna, prowadzące do unieruchomienia pojazdu, nierzadko wykluczające opłacalność jego remontu. Ponadto przyspieszenia o dużych wartościach działające w czasie eksplozji zagrażają bezpieczeństwu załogi, transportowanych ludzi i ładunku [2]. Stopień zagrożenia załogi zależy od jej odległości od miejsca detonacji, konstrukcji pojazdu, a w szczególności budowy dna kadłuba oraz od zamocowania i rodzaju siedzisk. Istotny wpływ ma także aranżacja wnętrza przedziału załogowego oraz sposób przewożenia i zamocowania wyposażenia osobistego. Podczas wybuchu najbardziej narażone na urazy są kończyny dolne. Spowodowane jest to najbliższym położeniem od miejsca detonacji i oddziaływaniem podłogi [8].

Przebiegi przyspieszeń pionowych w pierwszej kolejności określono 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 przedstawiono na rysunkach 4-5.



Rys. 4. Przebiegi przyspieszeń pionowych zarejestrowane dla osłony w kształcie litery „V” umieszczonej 200 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

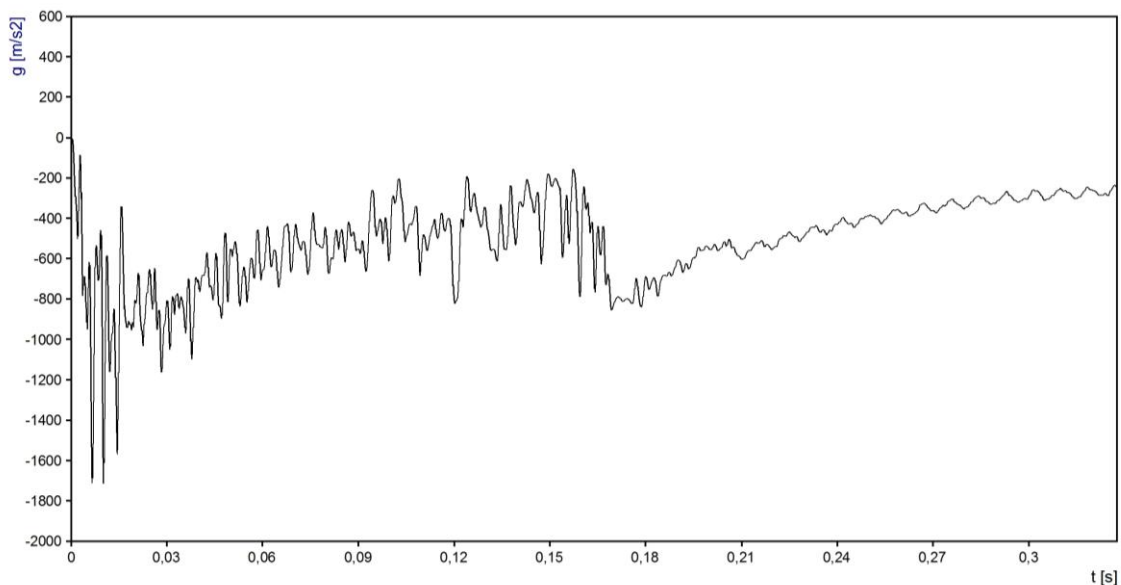


Rys. 5. Przebiegi przyspieszeń pionowych zarejestrowane dla osłony w kształcie litery „V” umieszczonej 400 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

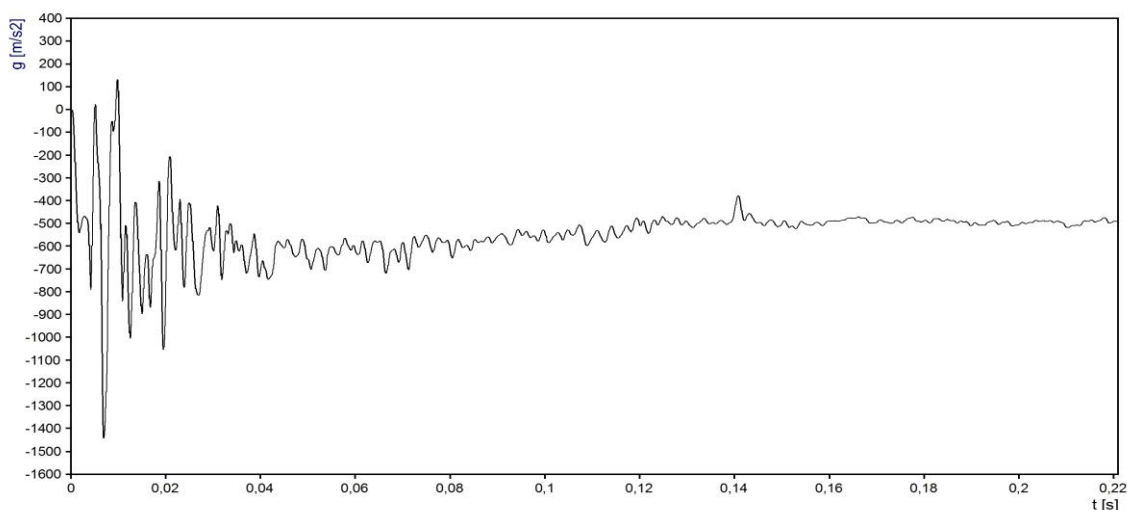
Na zarejestrowanych przebiegach przyspieszeń pionowych otrzymanych dla deflektora typu „V”, znajdującego się w odległościach 200 i 400 mm od centrum eksplozji obserwuje się duże różnice pomiędzy nimi, wynikające z dwukrotnej różnicy dystansu. Maksymalne wartości przyspieszeń nie przekraczają 4400 g dla pierwszej odległości i 800 g dla drugiej. Największa intensywność obciążenia impulsowego, które generuje stosunkowo duże wartości przyspieszeń pionowych następuje w przedziale czasu od 0,009 do 0,03 s od momentu eksplozji.

Kolejną badaną osłoną, dla której wyznaczano przebiegi przyspieszeń był deflektor w kształcie litery „U”. Tak jak w przypadku osłony typu „V”, wykonano po dwie próby dla każdego położenia (200 i 400 mm). Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 6-7.



Rys. 6. Przebiegi przyspieszeń pionowych zarejestrowane dla osłony w kształcie litery „U” umieszczonej 200 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*



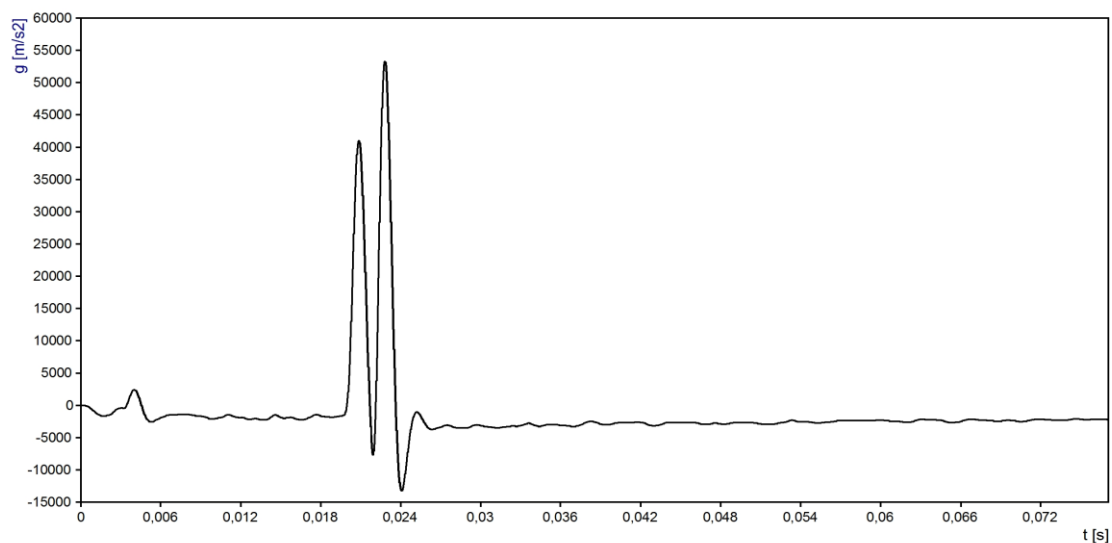
Rys. 7. Przebiegi przyspieszeń pionowych zarejestrowane dla osłony w kształcie litery „U” umieszczonej 400 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*

Wartości przyspieszeń pionowych dla osłony „U” ustawionej w odległości 200 mm od środka ładunku wybuchowego nie przekraczają 1800 g, zaś dla 400 mm 1500 g. Wydaje się, że ze względu na dwukrotnie większą odległość, podobnie jak w przypadku osłony

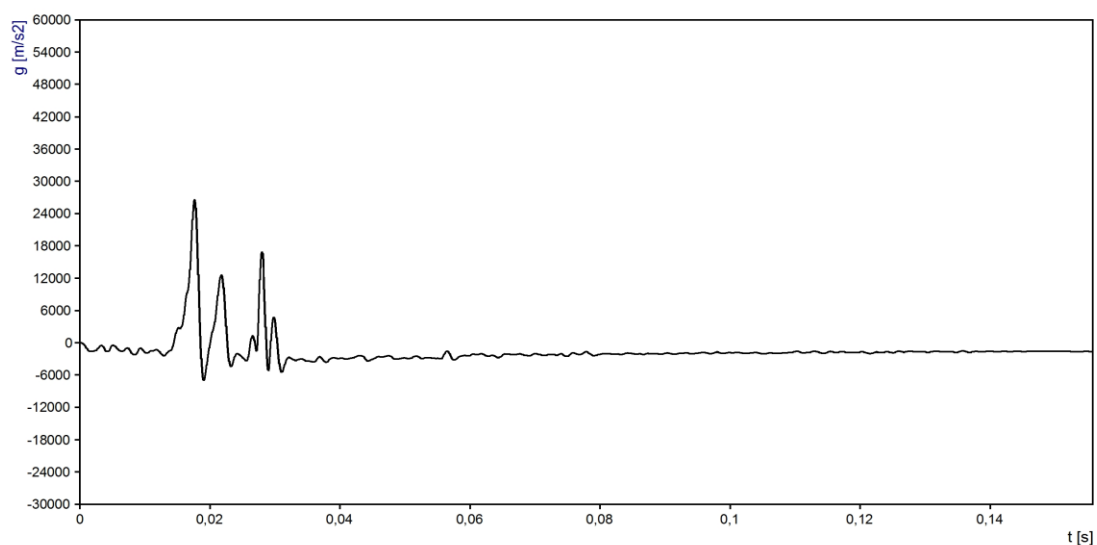
„V”, powinny one być bardziej znaczące. Największa intensywność obciążenia impulsowego występuje w takim samym przedziale czasu, jak w przypadku deflektora w kształcie litery „V”, tj. od 0,009 do 0,03 s od momentu detonacji.

Jako ostatnia badana była osłona płaska ustawiona w odległości 400 i 600 mm od centrum eksplozji. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 8-9.



Rys. 8. Przebiegi przyspieszeń pionowych zarejestrowane dla osłony płaskiej umieszczonej 400 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*



Rys. 9. Przebiegi przyspieszeń pionowych zarejestrowane dla osłony płaskiej umieszczonej 600 mm od środka ładunku wybuchowego

*Źródło: Opracowanie własne*



Na zarejestrowanych przebiegach przyspieszeń uzyskanych dla osłony płaskiej znajdującej się w odległościach 400 i 600 mm od centrum eksplozji, analogicznie jak w przypadku deflektora w kształcie litery „V”, obserwuje się duże różnice pomiędzy nimi, wynikające z dwukrotnej różnicy dystansu. Maksymalne wartości przyspieszeń nie przekraczają 55000 g dla pierwszej odległości i 30000 g dla drugiej. Podobnie jak we wcześniejszych próbach, największa intensywność obciążenia impulsowego, które generuje duże wartości przyspieszeń pionowych następuje w przedziale czasu od 0,009 do 0,03 s od momentu eksplozji. Uzyskane przebiegi badanego parametru potwierdzają, że pojazdy wojskowe nieposiadające wyprofilowanej dolnej części kadłuba są najbardziej narażone na obciążenia impulsowe wywołane detonacją ładunku wybuchowego, które mogą powodować poważne uszkodzenia konstrukcji, jak również stwarzać realne zagrożenia dla poruszających się nimi żołnierzy.

Z analizy rysunków 4-9 wynika, że zarejestrowane przebiegi przyspieszeń pionowych, podobnie jak w przypadku charakterystyk fali uderzeniowej wybuchu potwierdzają zasadę mówiącą, że jego wartość zależy od kąta padania fali [15]. Różnica w wartościach przyspieszeń pomiędzy dwoma osłonami dla odległości 200 mm wynosi 40,9%, a dla 400 mm 53,3%. W przypadku osłon płaskich wielkości badanego parametru znacząco rosną, osiągając 10-krotnie większe wartości od deflektorów w kształcie litery „V” i „U”. Wydaje się, że pomimo znacznie większego obciążenia udarowego, wywołanego przez odbitą falę uderzeniową nie powinny być one aż tak duże.

## WNIOSKI

Zapewnienie wysokiego poziomu ochrony załogom pojazdów wojskowych przed skutkami eksplozji ładunków wybuchowych w postaci improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED) oraz min lądowych wymusza zastosowanie szeregu rozwiązań konstrukcyjnych, wśród których najważniejsze to: odpowiednio ukształtowane osłony oraz materiały i struktury pochłaniających energię.

Przedstawione wyniki badań stanowią kolejny etap pracy nad optymalizacją kształtu podwozia pojazdu wojskowego, obciążonego falą uderzeniową wybuchu generowaną eksplozją ładunków wybuchowych. Dają możliwość określenia wpływu kształtu osłony oraz jej odległości od ładunku wybuchowego na przebiegi przyspieszeń pionowych

Przeprowadzone badania pozwalają sformułować następujące wnioski:

- wartości przyspieszeń, podobnie jak ciśnienie fali odbitej i impuls ciśnienia zależą od kształtu osłony (deflektora) oraz jej odległości od ładunku wybuchowego;
- największa intensywność obciążenia impulsowego, które generuje stosunkowo duże wartości przyspieszeń, następuje w przedziale czasu od 0,009 do 0,03 s od momentu eksplozji;
- uzyskanie prawidłowych przebiegów przyspieszeń, wywoływanych poprzez detonacje ładunków wybuchowych wymaga właściwego doboru aparatury pomiarowej oraz procedur rejestracji sygnału.

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

## LITERATURA

1. Arczewski K., Pietrucha J., Szuster J., *Drgania układów fizycznych*, Warszawa 2008.
2. Barnat W., *Dobór podstawowych parametrów warstwy dennej lekkiego pojazdu wojsk powietrzno desantowych*, [w:] „Szybkobieżne pojazdy gąsienicowe”, nr 1/2009, Gliwice 2009.
3. Barnat W., *Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu*, Warszawa 2010.
4. Blakeman S.T., Gibbs A.R., Jeyasingam J., *Study of the Mine Resistant Ambush Protected (MRAP) Vehicle Program as a Model for Rapid Defense Acquisitions*, Monterey 2008.
5. *General signal conditioning guide*, PCB Piezotronics 2009.
6. Harris C., Piersol A., *Harris' Shock and vibration handbook*. McGraw-Hill 2002.
7. Iluk A., *Koncepcja opancerzonego samochodu patrolowego klasy M-ATV*, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, nr 4/2010, Wrocław 2010.
8. Kania E., *Projektowanie środków ochrony przeciwminowej pojazdów specjalnych*, [w:] „Górnictwo Odkrywkowe”, nr 4/2010, Wrocław 2010, s. 272-276.
9. Osiński Z., *Teoria drgań*, Warszawa 1978.
10. Panowicz R., Barnat W., *Wpływ umiejscowienia ładunku wybuchowego na intensywność fali podmuchowej*, [w:] „Biuletyn WAT”, nr 1/2010, Warszawa 2010.
11. Pennetier O., Desrosier C., Renard J., Deprince X., *Experimental study of vehicles submitted to the blast wave of a mine: pressures and impulses measurements*, Bad Reichenhall 2004.
12. Powłędzio A., *Obciążenia udarowe sztywno posadowionych mechanizmów okrętowych wywołane falą ciśnienia od niekontaktowego wybuchu podwodnego*, [w:] *Sympozjum siłowni okrętowych - Symso 2006*, materiały pokonferencyjne, Gdynia 2006.
13. Reinecke J.D., Snyman I.M., Ahmed R., Beetge F.J., *Vehicle landmine protection validation testing*, A CSIR Defence, Peace, Safety and Security, PO Box 395, Pretoria, 0001.
14. Reinecke J.D., Snyman I.M., Ahmed R., Beetge F.J., *A safe and secure South Africa Vehicle landmine protection validation testing*.
15. Saska P., Czmochowski J., *Analiza charakterystyk fali uderzeniowej wybuchu obciążającej osłony o różnym kształcie*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, nr 2/2012, Wrocław 2012.
16. Trzeciński 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.
17. Wilson J., *Sensor technology handbook*, 2005.
18. Zieliński T., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, Warszawa 2005.

**STUDYING IMPACT OF DEFLECTOR SHAPE ON ACCELERATIONS  
FORCED BY EXPLOSION OF SMALL EXPLOSIVE CHARGE**

**Summary**

*This paper presents the results of experimental tests of accelerations caused by the detonation of low-power explosive charges. The field tests were performed on a specially-designed research station. With the right design and the correct selection of the measuring equipment, vertical accelerations were measured for the three basic shields used in explosion-resistant vehicles. The recorded parameters were analysed in terms of the angle of the impact of the shock wave on the shield and its distance from the centre of the detonation on their size.*

**Keywords:** *mine-resistant vehicles, shock wave, explosion, ballistic shields, accelerations*